



HAL
open science

Partage de processus spatiaux d'orientation entre remémoration et maintien postural : vers une conception incarnée et située de la mémoire épisodique

Maëlle Tixier

► To cite this version:

Maëlle Tixier. Partage de processus spatiaux d'orientation entre remémoration et maintien postural : vers une conception incarnée et située de la mémoire épisodique. Sciences cognitives. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALS011 . tel-03813157

HAL Id: tel-03813157

<https://theses.hal.science/tel-03813157>

Submitted on 13 Oct 2022

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : PCN – Sciences cognitives, psychologie et neurocognition
Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Maëlle TIXIER

Thèse dirigée par **Corinne CIAN**, Ingénieur HDR, DGA, et
co-encadrée par **Stéphane ROUSSET**, Maître de
Conférences, Université Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire de Psychologie et Neuro
Cognition**
dans l'**École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la
Cognition et l'Environnement**

**Partage de processus spatiaux d'orientation
entre remémoration et maintien postural : vers
une conception incarnée et située de la mémoire
épisodique**

**Sharing spatial orientation processes between
recollection and postural control: towards an
embodied and situated conception of episodic
memory**

Thèse soutenue publiquement le **18 Mars 2022**,
devant le jury composé de :

Madame Anne-Emmanuelle PRIOT

INGÉNIEUR HDR, DGA, Rapporteur

Monsieur Lionel BRUNEL

PROFESSEUR ASSOCIÉ, Université Paul Valéry Montpellier 3, Rapporteur

Madame Pascale PIOLINO

PROFESSEURE DES UNIVERSITÉS, Université Grenoble Alpes,
Examinatrice

Monsieur Denis PERRIN

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, Université Grenoble Alpes, Président

Monsieur Rémy VERSACE

PROFESSEUR ÉMÉRITE, Université Lumière Lyon 2, Invité

Madame Corinne CIAN

INGÉNIEUR HDR, DGA, Directrice de thèse, Invitée

Monsieur Stéphane ROUSSET

MAÎTRE DE CONFÉRENCES, Université Grenoble Alpes, Co-encadrant de
thèse, Invité



Résumé

Ce travail s'inscrit dans une conceptualisation de la mémoire épisodique comme processus cognitif incarné et situé de nature spatiale. La remémoration épisodique s'est vue peu à peu attribuer un caractère constructif et spatial. La théorie de la construction de scènes (Maguire et collaborateurs, 2013) propose que la remémoration se base sur la (re)construction du contexte spatial de l'épisode dans lequel sont intégrés les autres éléments du souvenir (e.g., qui, quoi). La remémoration serait alors un processus spatial même lorsque l'objet du rappel n'est pas de nature spatiale. Le but de cette thèse est de mettre en évidence l'implication de processus spatiaux d'orientation lors de la remémoration grâce à un paradigme de double tâche cognition-posture. Dans la continuité de la théorie du partage de processus spatiaux entre posture et cognition, nous faisons l'hypothèse que la remémoration, de par sa nature spatiale, interférera avec le maintien postural. Cette interférence serait absente pour la tâche mnésique sémantique car elle n'implique pas de processus spatiaux.

Dans l'expérience 1, nous avons fait varier le niveau d'implication du processus spatial dans le maintien postural. La remémoration devrait être meilleure en position couchée (ne nécessitant pas de maintien de l'équilibre) par rapport à la condition debout (impliquant un contrôle postural). Bien qu'aucun effet d'interaction n'ait été observé, les résultats soulignent l'intérêt de la mesure posturale en situation de double tâche. Dans une seconde expérience, nous avons mis l'accent sur les variations du signal postural en fonction de la nature de la tâche mnésique. Les résultats mettent en évidence une repondération des informations sensorielles (i.e., vicariance) contribuant au maintien de la position debout. Les variations des paramètres posturaux entre tâches épisodique et sémantique sont analogues à celles observées lors de la comparaison entre une tâche explicitement spatiale et une tâche non spatiale. Dans la seconde partie expérimentale de ce travail, nous avons induit une perturbation des processus spatiaux d'orientation grâce à un mouvement visuel uniforme en roulis (vection). Cette stimulation visuelle induit une sensation illusoire de déplacement de soi et une déviation de la verticale perçue, sans manipuler explicitement la position du corps dans l'espace. L'expérience 3 met en évidence une détérioration globale des performances mnésiques. Cependant la comparaison entre une situation de vection et un environnement statique pose la question d'un confondu lié à la présence ou non d'un mouvement visuel. Nous avons donc opposé un environnement visuel en mouvement uniforme, à une condition de mouvement visuel non uniforme (absence de vection). L'expérience 4 nous a ainsi permis d'évaluer les modifications des paramètres posturaux spécifiques à la vection. L'expérience 5 réalisée en situation de double tâche posture-mémoire met en évidence l'interaction attendue entre l'environnement visuel et la nature de la tâche mnésique au niveau des paramètres posturaux isolés dans l'Expérience 4. La remémoration en condition de vection engendre une instabilité posturale et une redirection de l'attention vers la posture.

Ces résultats suggèrent une implication de processus spatiaux en mémoire épisodique qui seraient partagés avec le maintien postural, et ce même lorsque le rappel n'implique pas la composante spatiale de l'épisode de manière explicite. Ces données sont compatibles avec la notion de construction de scènes, qui supposent que le contexte spatial sera (re)construit lors de la remémoration. Ce travail ouvre de nouvelles perspectives telles que la mise en place d'un paradigme comportemental pour caractériser plus finement l'aspect spatial de la remémoration. Ce travail souligne l'intérêt de la mesure posturale pour l'évaluation du partage de processus entre la remémoration épisodique et d'autres tâches telles que la navigation ou imagerie mentale de scènes.

Mots-clefs

Remémoration épisodique, théorie de la construction de scènes, double tâche, équilibre postural, processus spatiaux d'orientation, vection

Abstract

In this thesis, episodic memory is conceptualized as a spatial, embodied, and situated cognitive process. Recollection, initially defined as a mental travel through time and space (Tulving, 2002), has gradually been given a constructive and spatial nature. Scene construction theory (Maguire & al., 2013) assumes that recollection is based on a process of spatial (re)construction. This construction is based on the reconstruction of the spatial context of the episode in which the other components of memory (e.g., who? what?) are integrated. Thus, recollection would be a spatial process, even if the object of the recall is not spatial in nature. This work aims to highlight the requirement of spatial orientation processes during recollection through a dual-task cognition-posture paradigm. Consistent with the shared spatial process hypothesis, we hypothesize that recollection will interfere with postural control, both of which requiring spatial orientation processes. This interference will not be observed for a semantic memory task, as it does not involve spatial processes.

In Experiment 1, we manipulated the spatial orientation processes required to maintain balance. Recollection should be better in the supine position (requiring no balance maintenance) compared to the standing condition (involving postural control). The expected interaction effect on memory performances was not observed. Nevertheless, the results highlighted the relevance of postural measurement in dual-task situations. In a second experiment, we focused on variations in the postural signal according to the nature of the memory task. Results showed a reweighting of the processes involved in maintaining the standing position without any changes in postural stability (i.e., vicariance) as a function of the memory tasks (i.e., episodic versus semantic). In line with our hypothesis, postural parameter changes are similar to those observed when comparing an explicitly spatial task with a non-spatial task. In the second experimental part, we induced a perturbation of spatial processes during memory tasks using a uniform visual roll motion. This motion induces an illusory sensation of self-displacement (i.e., vection) and a deviation of the perceived vertical, without explicitly manipulating the body orientation and position. The Experiment 3 showed an overall decrease in memory performance for both tasks when facing the moving environment. This could be explained by the mere presence of visual motion. To address this possibility, we opposed a visual environment in uniform motion (vection), to a non-uniform visual motion condition (no vection). Experiment 4 isolated the changes in postural parameters specific to the vection condition. Experiment 5 carried out in a dual posture-memory task situation, highlights the expected interaction between the visual environment and the nature of the memory task and this at the level of the postural parameters isolated in Experiment 4. Recollection during vection induced a greater postural instability and draw attention to postural control.

These results suggest an involvement of spatial processes in episodic memory that would be shared with postural control, even when the recollection does not involve explicitly the spatial component of the episode. These data are consistent with the scene construction theory, which assumes that, regardless of the nature of the item to be recalled, the spatial context in which it first appeared will be (re)constructed during recollection. This work opens new perspectives such as the development of a behavioral paradigm to characterize more precisely the spatial aspect of the recollection process. This theoretical approach suggests that postural measures may be useful to assess the spatial process sharing between recollection and other tasks like navigation or mental imagery of scenes.

Key-words

Recollection, scene construction theory, dual task, postural equilibrium, spatial orientation processes, vection

Remerciements

Mes premières pensées se tournent vers **Stéphane**, merci de m'avoir accompagné pendant toutes ces années, vous m'avez énormément apporté, tant sur le plan personnel que professionnel. Je suis extrêmement reconnaissante de tout ce que vous avez fait pour moi. Vos conseils, votre patience et votre écoute m'ont fait grandir, en tant qu'enseignante (même si ce fut bref), mais également en tant qu'apprentie chercheuse. Merci est un mot bien trop faible dans ce cas. Je te remercie aussi vivement **Corinne**, pour ta joie de vivre et ta passion pour la recherche que tu as su insuffler dans ce travail. Grâce à toi j'ai pu voir tous les bons côtés de ce métier ! Enfin merci à tous les deux en tant qu'équipe, je n'aurai pas pu espérer meilleure combinaison. Votre complémentarité a rendu ce travail ensemble passionnant et enthousiasmant ! Merci **Pierre-Alain** pour tous tes tours de magie qui ont permis de récolter mes données et de les prétraiter dans de superbes conditions.

Je souhaite remercier **Rémy Versace** et **Elsa Spinelli** qui ont suivi chaque année l'avancé de ce travail. Merci pour vos conseils, vos encouragements et votre bienveillance. Merci également à **Anne-Emmanuelle Priot**, **Lionel Brunel**, **Pascale Piolino** et **Dennis Perrin**, membres du jury, d'avoir accordé de leur temps pour évaluer ce travail.

Merci au LPNC de m'avoir si bien accueilli pendant ces quatre années. Mes pensées se tournent plus particulièrement vers les doctorants qui ont occupé les bureaux plus ou moins voisins. Merci pour votre gentillesse et le partage que vous faites régner dans cette petite communauté. Merci à **Ali**, pour toutes les discussions passionnantes toujours agrémentées de graphiques à but illustratif. Merci **Samuel**, mi-investisseur mi-graphiste de données EEG, ton goût pour les chaussettes extravagantes restera un très bon souvenir ! Merci **Olivier**, pour tes blagues (même si elles ne sont pas toutes excellentes, disons-le bien), tu as égayé notre bureau (bien que la blague de la gourde ne soit pas très bien passée !). Merci **Brice** pour ta patience encore plus limitée que la mienne et les discussions sur les comportements exaspérants dont nous avons pu être témoin qui ont suivi ! Merci **Elie** pour ton soutien en fin de thèse, tes performances musicales appliquées au traitement émotionnel sont sans pareil, mais les nombreuses discussions autour des drosophiles et de l'évolution des espèces étaient tout aussi passionnantes. Merci à **Elise**, **Célise** et **Sonja** qui m'ont toujours accueillie chaleureusement dans leur bureau à toutes heures et pour n'importe quelle raison ! Merci **Lucrece** pour ta gentillesse, discuter avec toi est toujours tellement passionnant ! Merci pour ton soutien pendant la rédaction, nous sommes tous dans le même bateau, alors courage ! Merci **Merrick**,

*ta décontraction naturelle et tes paradigmes philosophiques curieux conduisent parfois la discussion vers des débats inattendus, mais tout à fait intéressants ! Merci **Camille** pour avoir si bien illustré pendant ces quatre années que loin des yeux ne veut pas forcément dire loin du cœur. Merci **Guillaume** car les discussions critiques autour du monde que ce soit celui de la recherche ou en général ont été une vraie oasis lorsque le doute était présent, mais nous le savons maintenant, on n'est pas fou, c'est le monde qui l'est ! Merci **Marion** pour ton amitié, tout simplement ! Merci en vrac à tous les doctorants, **Méline, Rémi, Audrey, Lise, Cynthia, Adeline, Léa, Candice, Lisa, Audrey**, et tous les autres !*

*Je souhaite également remercier tous les enseignants qui ont croisé mon chemin et qui ont contribué à ce que je suis aujourd'hui, ils seraient bien trop nombreux pour être tous cités, mais un grand merci pour leur temps et leur dévotion. Merci également à tous les participants qui ont donné de leur temps et grâce à qui ce travail a pu être réalisé. Enfin, merci aux étudiants de psychologie, **Childéric, Imène, Quentin** et **Mathilde**, qui ont pris part au projet pour un bout du chemin.*

*Merci **maman** d'avoir été la première enseignante de ma vie et de ne m'avoir jamais fait défaut, c'est tellement rassurant de pouvoir compter sur quelqu'un comme toi. Merci pour tes petits plats réconfortants qui m'ont fait gagner un temps précieux ! Merci à ma **petite sœur**, de me démontrer chaque jour que l'on peut apprendre des plus petits que soi. Mille mercis pour toutes tes questions passionnantes sur la mémoire, pouvoir compter sur ton soutien a pour moi une valeur inestimable. Merci à mon **papa**, je sais que tu me soutiens même si tu n'arrives pas à l'exprimer tous les jours.*

*Enfin, mais pas des moindres, merci **Fabien** d'avoir été mon éditeur personnel ! Merci de m'avoir soutenu même si tu n'as jamais vraiment compris l'intérêt d'une thèse. Avoir ton soutien en sachant que tu aurais fait des choix totalement différents est la plus belle preuve d'amour que tu aies pu me donner. Un immense merci car sans toi et la confiance que tu m'as donnée en moi-même, je n'aurais pas pu terminer ce travail.*

Merci à toi lecteur, car sans toi ces mots ne prendraient pas vie.

Table des Matières

<i>Résumé</i>	3
<i>Abstract</i>	4
<i>Remerciements</i>	5
<i>Table des Matières</i>	7
<i>Notes</i>	14
<i>Abréviations</i>	14
<i>Préambule : Définitions, concepts, raisonnement général et hypothèses</i>	15
Chapitre 1: La remémoration épisodique, un processus spatial ?	22
I- Effets spatiaux de contenu et de processus en mémoire épisodique	24
A) L'importance du contexte spatial de par la définition d'un souvenir épisodique	24
B) De l'importance du point de vue dans l'expérience de remémoration : vers le contexte spatial comme organisateur d'épisodes	25
C) Les effets de contexte, au-delà de la compatibilité, une preuve expérimentale en faveur d'un rôle du contexte spatial dans l'organisation de la mémoire épisodique	28
II- Comment les modèles de la mémoire épisodique ont-ils intégré le traitement spatial? D'un contenu spatial à un processus spatial	30
A) La théorie de l'hippocampe comme carte cognitive : le contenu spatial de l'épisode est responsable de l'implication de l'hippocampe pendant la remémoration ...	32
B) La théorie multi-traces (MTT) : l'hippocampe comme index, structure de liaison entre les composantes mnésiques.....	34
C) Le modèle de Byrne, Burgess et Becker (BBB) : la notion de spatial comme contenu et comme traitement à l'encodage et à la récupération	37

D)	La théorie de la simulation : développer l'aspect constructif de la remémoration .	45
E)	La théorie de la construction de scènes : la remémoration basée sur un processus spatial constructif commun à de nombreuses tâches	48
III- Les conséquences de la notion de construction sur l'appréhension de la cognition		53
A)	Simulation épisodique constructive ou construction de scènes : Quelle(s) différence(s) ?	54
B)	Que devient l'hypothèse du singularisme des épisodes ?	59
C)	Imagination, projection dans le futur et remémoration d'épisodes vécus : entre continuisme et discontinuisme	61
D)	Comment distinguer un événement vécu de l'imagination et de la projection dans le futur ? L'hypothèse d'une propriété mnésique du processus : le concept de fluence...	62
IV- Conclusion		66

Chapitre 2: La posture comme moyen d'évaluer la présence d'un processus spatial lors de la remémoration70

I- Quelle est l'origine de l'interaction posture cognition ? De l'hypothèse d'un partage de ressources centrales vers l'hypothèse d'un partage de traitement spatial		71
A)	L'hypothèse d'une capacité générale de traitement limitée	71
B)	L'hypothèse du partage d'un traitement de nature spatial entre posture et cognition	73
II- Comment prédire quelle tâche sera impactée par la situation de double tâche ?		78
A)	L'hypothèse d'une priorisation de la tâche spatiale ou de la tâche cognitive pour l'accès aux ressources de traitements	78
B)	La question de l'utilité fonctionnelle du maintien postural pour la réalisation de la tâche cognitive	79
III- Qu'en est-il des situations de double tâche qui impliquent des tâches de mémoire ?		82
A)	La mémoire à court terme	83

B)	La mémoire épisodique	85
C)	La mesure posturale comme indice de l'incarnation d'une tâche cognitive	88

IV- La mémoire comme activité de nature sensori-motrice enracinée dans le corps et située dans un environnement **91**

A)	Preuves expérimentales en faveur d'une nature sensori-motrice de la mémoire	91
B)	Quel impact de l'ancrage sensori-moteur dans la conceptualisation de la mémoire ? Le modèle Act-in.....	94

V- Conclusion **96**

Chapitre 3: Existe-il un lien entre contrôle postural et mémoire épisodique ? **99**

I- Comment les différents niveaux d'explication d'une interférence contraignent méthodologiquement la situation de double tâche posture-cognition..... **100**

A)	L'importance de l'étape de résolution des deux tâches pendant la mesure de l'interférence	100
B)	L'importance de la modalité de présentation des stimuli	101
C)	La localisation de la stimulation dans le champ visuel.....	105
D)	Le partage d'un code de résolution entre les tâches.....	105
E)	Difficultés d'interprétation des données en situation de double tâche : question de la condition de référence et des consignes	106
F)	Choix des tâches mnésiques et de l'environnement sensoriel de la situation de double-tâche	110

II- Expérience 1 : Evaluation du partage d'un processus spatial d'orientation entre la mémoire épisodique et le contrôle postural. Comparaison de la position debout et de la position couchée. **113**

A)	Raisonnement général et hypothèses	113
B)	Méthode	118
1.	Participants.....	118
2.	Matériel	118
3.	Procédure	120

C)	Résultats	121
D)	Indicateurs posturaux et analyse posturale exploratoire	123
E)	Discussion	124
III- Expérience 2 : Interaction entre la mémoire à long terme et le contrôle postural : effet différentiel en mémoire épisodique et sémantique sur le maintien de la position debout. 129		
A)	Raisonnement général et hypothèses	129
B)	Méthode	131
1.	Participants.....	131
2.	Matériel.....	132
3.	Procédure	132
C)	Mesures et tests statistiques	134
D)	Résultats.....	135
1.	Performances mnésiques.....	135
2.	Paramètres posturaux	136
E)	Discussion	139
IV- Conclusion générale 142		
Chapitre 4: La vection comme perturbateur de l'orientation posturale pour mettre en évidence un processus spatial lors de la remémoration épisodique.....145		
I- Vection, définitions et généralités..... 146		
A)	Vection des définitions.....	146
B)	Les différents types de vection.....	147
C)	Comment générer expérimentalement une vection ? Les caractéristiques physiques de la stimulation.....	149
D)	Comment générer expérimentalement une vection ? Les effets de consignes..	150
II- Conflits sensoriels : le cas particulier de la vection circulaire en roulis 152		
A)	Les bases physiologiques à l'illusion de mouvement	152
B)	Différences inter-individuelles et conflits sensoriels	154

III- L'hypothèse d'un partage de processus d'orientation spatiale entre mémoire épisodique et vection.....	156
A) La mise à jour de son orientation dans l'espace grâce à la vection en lacet	157
B) Modification de l'orientation spatiale grâce à la vection en roulis	159
C) Perturbation posturale lors d'une stimulation en mouvement uniforme.....	161
D) Choix de la vection en roulis et objectif des expériences	163
IV- Introduction générale aux Expériences 3 ; 4 et 5	164
A) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? L'hypothèse d'un partage de ressources attentionnelles globales	165
B) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? L'hypothèse d'un partage de ressources spatiales.....	167
C) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? Une question souvent posée en termes de compatibilité d'informations	167
D) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? L'hypothèse d'un partage de processus et non de ressources attentionnelles ou d'informations sensorielles.....	170
V- Expérience 3 : Vection en position assise pendant la réalisation de tâches mnésiques épisodique et sémantique	171
A) Méthode	171
1. Participants.....	171
2. Matériel.....	171
3. Procédure	173
B) Résultats	174
1. Auto-report de la vection en situation de simple tâche.....	174
2. Performances mnésiques.....	175
C) Discussion	177
VI- Expérience 4 : Effet d'une stimulation visuelle en mouvement sur la posture	180
A) Hypothèses	180
B) Méthode	182
1. Participants.....	182
2. Matériel.....	182
3. Procédure	185

C)	Indicateurs posturaux	186
D)	Résultats	187
E)	Analyses complémentaires.....	189
F)	Discussion	191

VII- Expérience 5 : Vection en position debout pendant la réalisation de tâches mnésiques épisodique et sémantique..... 193

A)	Hypothèses	193
B)	Mesures	195
C)	Méthode	195
1.	Participants.....	195
2.	Matériel	196
3.	Procédure	196
D)	Résultats	198
1.	Effet du mouvement visuel sur les performances mnésiques	198
2.	Effet du mouvement visuel et des tâches mnésiques sur les indicateurs posturaux.....	198
3.	Analyses complémentaires.....	201
E)	Discussion	202

VIII- Conclusion du chapitre et perspectives

Chapitre 5: Conclusion générale et perspectives expérimentales

I- Rappel de la problématique, principaux résultats et limites

II- Perspectives expérimentales.....

A)	Existe-t-il un profil postural spécifique de la présence d'une construction de scènes ?	219
B)	Un processus spatial de construction de scènes sous-tend-il la remémoration épisodique ? Réflexions autour de l'élaboration d'un paradigme comportemental.....	221
C)	Le paradigme de Remember-Know comme indicateur de l'épisodicité ?	223

Références.....	227
Table des Figures	252
Table des annexes	254

Notes

- Lorsque le terme « interaction » est utilisé en dehors des sections de résultats il est à comprendre dans son sens littéraire, à savoir « réaction réciproque de deux phénomènes l'un sur l'autre » (Larousse, 2020). *Interaction* sera préférée au terme interférence qui a une connotation négative, avec l'idée d'une dégradation de performances plutôt que d'une modification de la réalisation des tâches du cours du temps de par leur simultanéité.

- Par souci de clarté, l'anglicisme « expérimenter » est utilisé pour désigner le fait « d'éprouver, de faire l'expérience d'une situation, d'une sensation, d'un sentiment » de manière subjective, en opposition à « expérimenter » qui est utilisé dans son sens scientifique « Soumettre quelque chose à une expérience [scientifique] afin d'en déterminer les différentes propriétés. » (cnrtl.fr). Madelrieux (2012) propose de redonner sa chance au terme « expérimenter », en lui retirant l'aspect dualiste (i.e., corps vs. esprit) qui a pu lui être associé.

- Dans cette thèse, l'hippocampe sera évoqué de nombreuses fois. Cependant, cette structure n'est pas la seule impliquée dans la remémoration. Le processus de remémoration implique un large réseau d'aires cérébrales. Cette thèse ne vise pas à établir quel est le réseau impliqué dans la remémoration, c'est pour cette raison que les structures évoquées ne représentent pas une liste exhaustive de toutes les zones cérébrales ayant été étudiées dans le cadre de la mémoire épisodique. Le but ici est d'amener quelques preuves expérimentales en imagerie cérébrale en faveur ou non des différents modèles de mémoire. Le biais de sélection des études d'imagerie ne permet donc aucune conclusion fiable concernant le réseau impliqué dans la remémoration épisodique sur la seule base de cette thèse.

- Posture versus position : Il est important de bien distinguer ces deux termes qui ne seront pas usités dans le même but tout au long de cette thèse. La position désignera la « manière dont une chose est placée, située ». Par exemple, la position assise, couchée ou debout que le participant doit maintenir pendant l'expérience. Le terme posture quant à lui sera utilisé pour désigner les processus mis en œuvre pour maintenir son équilibre, quelle que soit la position dans lequel le participant se trouve. Par exemple, gérer sa posture est indispensable pour maintenir une position debout sur un pied. Lorsque nous parlerons de mesures, nous utiliserons le terme posture, car grâce à plusieurs indices (temporels et fréquentiels) nous pouvons accéder aux processus de traitement des informations qui concourent à l'équilibre.

Abréviations

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

CoP : Center of Pressure [under the feet], en français centre de [pression sous les pieds]

Modèle BBB : Modèle de Byrne, Burgess et Becker

Préambule : Définitions, concepts, raisonnement général et hypothèses

Nous nous intéresserons tout au long de cette thèse à la mémoire épisodique qui est définie comme la capacité à se souvenir d'un événement ou épisode (Tulving, 1972), occurrence particulière et unique dans le passé. Par exemple, je me souviens de mes dernières vacances à la montagne, lorsque j'ai skié avec ma sœur pour la première fois, le soulagement que j'ai ressenti lorsque nous nous sommes assises dans un bar pour commander un thé bien chaud. Des éléments comme *Qui était présent ? Où se déroule l'action ? Quelles émotions ai-je ressenties ? Quelles odeurs/couleurs/sensations ?* viennent agrémenter le souvenir pour le rendre vivace et nous donner l'impression de nous retrouver de nouveau ce jour-là en train de boire un thé avec les jambes flageolantes. La mémoire épisodique est donc définie comme une capacité à voyager mentalement dans le temps et dans l'espace (Tulving, 2002). Cette hypothèse de voyage mental suppose donc que nous puissions nous transporter, sans nous déplacer, dans le lieu du souvenir qui est le plus souvent différent de celui que nous expérimentons dans le présent. Cette remémoration épisodique a cela de particulier qu'elle s'accompagne d'une sensation de reviviscence (réapparition d'états de conscience déjà éprouvés) qui lui est propre. En effet, il est usuel de distinguer la mémoire épisodique d'autres formes de mémoire de par son contenu, mais surtout grâce à cette sensation du « comme si j'y étais [de nouveau] ». Tulving (2002) propose que cette capacité soit sous-tendue par la conscience auto-noétique. Il s'agit de la conscience de son existence au cours du temps, autrement dit, je sais que j'étais dans le passé, que je suis dans le présent, et que je serai dans le futur. La conscience d'une continuité de soi dans le temps permettrait donc, selon Tulving, de se projeter mentalement dans le passé, mais également dans le futur.

La mémoire épisodique est souvent opposée à la mémoire sémantique, qui elle, permet d'avoir accès à des concepts ou des connaissances générales sur le monde (Tulving, 2002). Ce rappel ne s'accompagne pas du souvenir des détails concernant le contexte d'apprentissage. Par exemple, je sais que la capitale de la France est Paris, mais je ne me souviens plus qui me l'a appris, ni où j'étais quand je l'ai appris, ni même quand exactement je l'ai appris. Cette forme de rappel n'est pas accompagnée de la remémoration du contexte spatio-temporel ni de la sensation de revivre le moment de l'apprentissage. La mémoire sémantique est donc, selon Tulving, associée à un état de conscience différent, la conscience noétique. Ainsi, aucune conscience de soi ou de sa pérennité dans le temps n'est nécessaire pour rappeler ces connaissances que nous avons sur le monde.

Pour évaluer expérimentalement l'épisodicité d'un événement rappelé, un des paradigmes couramment utilisés dans la littérature, le paradigme *Remember-Know*, est directement relié à ces niveaux de conscience. Ce paradigme propose de distinguer les réponses se basant sur la sensation de revivre l'événement passé, qui est présent lors de la remémoration épisodique, des réponses qui ne sont pas accompagnées de cette sensation. L'intérêt est donc de dissocier les rappels basés sur la mémoire épisodique de ceux qui ne sont pas basés sur elle. Dans ce paradigme le participant doit labelliser la sensation expérimentée lors du rappel, tout de suite après celui-ci. Si le participant est mentalement transporté dans le passé lors du rappel, avec cette sensation de reviviscence si caractéristique de la remémoration épisodique, il devra alors labelliser son rappel *remember*. Au contraire si cette sensation de revivre le moment de l'apprentissage est absente il devra, à la suite de son rappel, le qualifier de *know*. La sensation de « je me souviens » est ainsi opposée à la sensation de « je sais ». Au départ, ce paradigme semblait pouvoir dissocier la mémoire épisodique de la mémoire sémantique car les réponses *remember* et *know* semblaient être influencées par des variables distinctes (Tulving, 1985). Cependant, l'hypothèse selon laquelle les réponses *remember* seront affectées par des variables de traitement conceptuelles (de type profondeur d'encodage, voir Gardiner, 1988) alors que les jugements *know* seront influencés par des variables perceptives (e.g., la fluence perceptive n'a d'effet que sur les réponses *know* voir Rajaram, 1993) n'est pas toujours soutenue par les données (e.g., la similarité de police d'écriture entre l'encodage et le rappel augmente les réponses *remember*, Yonelinas et Jacoby, 1995). Hirshman et Master (1997) proposent que ce paradigme reflète un critère de décision basé sur la familiarité de l'item, au-dessus duquel la réponse *remember* est choisie, alors que s'il n'est pas dépassé, le rappel sera considéré comme *know*. Au contraire, Yonelinas (1999) propose que les réponses *remember* reflètent la *recollection* tandis que les réponses *know* reflètent une simple familiarité.

Ainsi, certains modèles de mémoire épisodique distinguent la *recollection* (ou remémoration épisodique) de la familiarité en les définissant comme deux processus distincts alors que d'autres n'y voit qu'un continuum, et donc des variations dans un même processus. Dans le cas des réponses *know*, basées sur la familiarité, tous les modèles s'accordent à penser que cet aspect de reviviscence n'est pas présent. Ainsi, dans le cas d'une réponse basée sur la familiarité (ou sur une plus faible familiarité dans le cas du continuum), les détails contextuels ne sont pas rappelés et la sensation de se replonger dans le passé n'est pas présente. Que la familiarité et la remémoration soient vues comme deux processus distincts ou comme

un continuum, il est admis que les tâches mnésiques peuvent engendrer à la fois des réponses basées sur la familiarité et des réponses basées sur la remémoration.

Généralement dans la littérature, du fait des contraintes de réponses imposées par certaines tâches, le simple fait que la réponse du participant soit correcte peut être considéré comme suffisant pour conclure à une implication de la mémoire épisodique. Dans le cas par exemple d'un rappel libre, le participant a pour consigne d'énoncer de nouveau le plus de mots possible appris au début de l'expérience. Pour répondre correctement à la tâche, le participant est obligé de se référer à un moment délimité dans le passé, c'est-à-dire au moment de l'apprentissage. Cependant, dans le cas d'une tâche de reconnaissance, qui consiste à évaluer si le mot présenté est un mot appris ou nouveau, le jugement peut se faire soit par la référence au moment de l'apprentissage (dans ce cas, il s'agirait d'une remémoration épisodique) soit par une impression que le mot a déjà été présenté sans pour autant revivre le moment de l'apprentissage (c'est la sensation de familiarité). Dans ce deuxième cas, la réponse peut être correcte sans que le processus utilisé pour résoudre l'essai ait les caractéristiques de ce que l'on nomme remémoration épisodique. Les réponses peuvent donc être données sur la base de la familiarité ou de la remémoration, car l'accès au contexte de l'apprentissage n'est pas nécessaire pour réussir la tâche. Yonelinas (1999) souligne que dans une tâche de reconnaissance ce sont les réponses basées sur la familiarité qui prédomineraient, alors qu'une tâche de mémoire de source favoriserait la présence du processus de remémoration épisodique par rapport à celui de la familiarité. En effet, une tâche de mémoire de source consiste à rappeler le contexte d'apprentissage dans lequel le mot a été appris. Comme pour la reconnaissance, un contenu appris (e.g., un mot, une image) est présenté (auditivement, visuellement, dans des lieux ou listes distinctes), mais ici le participant doit répondre par le contexte d'apprentissage, par exemple le numéro de la liste dans laquelle a été appris le mot. Déterminer les caractéristiques contextuelles de l'épisode d'apprentissage est alors une condition nécessaire pour répondre correctement à la tâche. Cet accès aux informations contextuelles est présent lors de la *recollection* et non lors du sentiment de familiarité, ce qui rend moins probable une réponse basée seulement sur de la familiarité. Ces considérations théoriques impliquent donc qu'il ne soit pas toujours nécessaire d'avoir recours au paradigme de *remember-know* car le choix de la tâche peut être fait afin de maximiser un type de réponse.

Les détails contextuels (spatio-temporels mais également sensoriels) sont donc une caractéristique spécifique à la remémoration épisodique, et permettrait de la dissocier à la fois de la mémoire sémantique et du sentiment de familiarité. Ces éléments qui constituent l'épisode

ont tout d'abord été envisagés comme constituant une trace stockée sous un format de représentation indépendant de leur nature sensorielle initiale, puis ont été étudiés dans le cadre de la cognition incarnée. Dans l'approche incarnée et située de la cognition, les connaissances issues des apprentissages ne sont plus considérées comme stockées sous forme amodale et abstraite mais sous forme sensori-motrices. Autrement dit, les connaissances émergent de la relation entre l'individu et l'environnement et cette interaction est par nature sensori-motrice. La cognition prendrait donc racine dans le corps. Des effets de l'interaction individu-environnement pourraient être observés sur la cognition, car elle n'est plus considérée comme amodale et indépendante du corps. Dans cette perspective de cognition incarnée et située, il est donc possible de prédire un effet du corps sur la mémoire. Par exemple, un effet de la position du corps sur la remémoration a été mis en évidence par Dijkstra, Kaschak et Zwaan (2007). Dans cette expérience, les participants sont invités à prendre différentes positions (e.g., assis, couché) pour rappeler des événements autobiographiques. Les événements s'étant déroulés dans le passé dans la position expérimentée dans le présent sont plus facilement rappelés que des souvenirs qui ne s'étaient pas déroulés dans cette position. Par exemple, lorsque le participant est couché, les souvenirs d'une visite chez le dentiste seront plus rapidement accessibles que les souvenirs d'un cours. La position du corps dans l'espace fait donc partie intégrante du souvenir. Il faut donc envisager la présence d'une composante sensori-motrice dans les épisodes rappelés. Cette composante posturale peut, au même titre que d'autres composantes du souvenir, favoriser le rappel d'événements congruents lorsqu'elle est présentée comme indice. La facilitation du rappel par la réactivation sensori-motrice modifie la conceptualisation de la mémoire. Ainsi, les effets du corps ou de l'environnement sur la cognition, difficilement prédits par des modèles cognitivistes, prônent en faveur de l'importance de la relation corps-environnement dans la perception et la cognition. En effet, dans le paradigme cognitiviste, le traitement cognitif est pensé comme le traitement effectué par un ordinateur sur une entrée, c'est-à-dire que les stimulations sensorielles sont transformées en code abstrait et arbitraire pour former une représentation qui sera stockée. Le traitement cognitif s'effectue ainsi sur ces symboles qui sont indépendants du contexte, de l'individu et de ce qu'ils représentent. Versace, Brouillet et Vallet (2018) soulignent cependant deux limites qui peuvent être avancées à l'encontre de ce paradigme. La première est la nature symbolique de la connaissance qui rend difficile l'explication de l'impact de manipulations sensori-motrices sur la cognition autrement que comme une charge supplémentaire de traitement. La seconde est la modularité de la cognition, qui signifie que chaque traitement se fait indépendamment des autres, ce qui engendre que la cognition ne devrait pas être impactée par la situation dans laquelle elle a lieu.

Dans cette thèse, nous proposons de pousser plus loin cette hypothèse d'incarnation du processus de remémoration. Au-delà des données expérimentales démontrant qu'une composante sensori-motrice est présente dans le souvenir, nous faisons l'hypothèse que le processus mis en jeu lors d'une remémoration épisodique fait appel à des processus également utilisés lors de l'interaction corps-environnement. En effet, si la cognition est perméable aux modifications corporelles et que l'hypothèse privilégiée est une interaction entre le corps et la cognition alors, une interaction étant une influence réciproque, le corps ne devrait donc pas lui non plus être considéré comme impénétrable par la cognition ni complètement indépendant de celle-ci. Ainsi, la mesure simultanée d'indices corporels et cognitifs dans une situation de double tâche pourrait permettre de mieux appréhender les processus à l'œuvre dans ces deux tâches, plus précisément s'ils sont communs ou non. En effet, si la réalisation des deux tâches demande des processus communs, les réaliser simultanément devrait générer des modifications par rapport à la situation dans laquelle elle est réalisée seule ou par rapport à la situation où elle est associée à une tâche ne faisant pas appel au(x) même(s) processus qu'elle.

Avec ce raisonnement, la cognition est conceptualisée comme enracinée dans un corps (incarné) et dans un environnement (située). Ainsi, réaliser une tâche cognitive et, par exemple, maintenir son équilibre pourraient partager un ou des processus nécessaires à leur réalisation en ligne. Mais quelle serait la nature de ce processus commun ? Lors de l'interaction avec l'environnement, des processus spatiaux sont nécessaires, à la fois pour maintenir sa posture, se repérer dans l'espace, se mouvoir ... De la même manière, nous verrons que le contexte spatial et le traitement spatial semblent jouer un rôle important en mémoire épisodique. Ainsi, le maintien postural et la remémoration pourraient tous deux nécessiter des processus spatiaux. Dans un premier chapitre, nous verrons donc quelles sont les preuves expérimentales en faveur d'un traitement spatial en mémoire épisodique, mais également comment le statut particulier accordé au contexte spatial prend une place plus ou moins importante dans les modèles de mémoire épisodique, qui dépassent alors la simple conceptualisation d'informations stockées, pour aboutir sur la proposition d'un processus spatial nécessaire lors de la remémoration. Nous présenterons donc des modèles proposant une nature simulatrice ou constructive de la mémoire épisodique en opposition aux modèles envisageant la mémoire comme un stock d'épisodes. Cependant, lorsque les modèles s'écartent de la notion de stockage d'épisodes qu'ils soient modaux ou amodaux, ils doivent faire face à certains défis pour expliquer certaines caractéristiques de la mémoire épisodique qui semblaient simples à conceptualiser dans les modèles de stockage. Par exemple, le sentiment de passivité (ou d'épisodicité) dans le cas du

stockage peut être expliqué très simplement comme une caractéristique de la trace, car sa simple présence en mémoire indique qu'il s'est produit dans le passé. Ces conséquences liées directement à la conception de la mémoire comme une construction seront abordées à la fin du **Chapitre 1**.

Après avoir présenté un faisceau de preuves en faveur d'un processus spatial mis en jeu pendant la remémoration épisodique, nous nous questionnerons sur la mesure adaptée à sa mise en évidence dans des expériences comportementales. La littérature suggère que notre posture est fortement influencée par notre interaction avec l'environnement (Samuel, Solomon et Mohan, 2015). En effet, elle varie en fonction des informations sensorielles et motrices disponibles à chaque instant (Assländer et Peterka, 2014). Les mesures posturales seraient donc un indicateur possible de l'interaction individu-environnement dans le présent. Elles permettraient ainsi d'évaluer si l'interaction spatiale individu-environnement dans le présent peut être modifiée par la remémoration ou au contraire modifierait cette remémoration épisodique. Dans le **Chapitre 2** nous aborderons alors les travaux ayant pour objectif de mettre en évidence une interaction entre la cognition et la posture. Nous partirons donc de l'hypothèse la plus générale de partage de ressources globales entre cognition et posture, pour arriver ensuite aux hypothèses plus spécifiques de partage de ressources spatiales. Nous étudierons enfin les quelques résultats qui permettent d'envisager la posture comme une mesure de l'incarnation d'une tâche cognitive.

Ces deux chapitres théoriques mettront en lumière l'hypothèse d'un traitement spatial lors de la remémoration épisodique ainsi que l'intérêt de la mesure posturale pour tester notre hypothèse de remémoration incarnée utilisant le même processus que celui nécessaire à l'orientation de notre corps dans l'espace. Le **Chapitre 3** proposera un paradigme de double tâche posture-remémoration pour tester expérimentalement cette hypothèse de partage de processus spatial. Le premier paradigme expérimental exploré repose sur la comparaison d'une situation dans laquelle la posture a recours à un processus spatial à une situation où ce processus est moins impliqué. Ceci permet d'évaluer l'effet du partage de ce processus spatial entre mémoire épisodique et maintien postural sur les performances cognitives (**Expérience 1**). Le paradigme expérimental est ensuite modifié pour avoir accès à des indicateurs posturaux pour toutes les conditions expérimentales. Ainsi, il sera possible d'évaluer l'effet de la situation de double tâche sur la posture en comparant une situation où elle est associée à une tâche nécessitant ce processus spatial, à une situation où la tâche mnésique associée à la posture ne fait pas appel à ce processus spatial (**Expérience 2**). Dans le **Chapitre 4** une série de trois expériences vise à maximiser le recours à des processus spatiaux d'orientation dans le maintien

de la posture en proposant une situation de remémoration face à un environnement visuel en mouvement qui met à l'épreuve l'orientation spatiale. La position assise est tout d'abord étudiée (**Expérience 3**) pour être remplacée ensuite par la position debout, plus difficile à maintenir, que nous avons associée à des mesures posturales (**Expérience 4 et 5**).

Le **Chapitre 5** débutera par un rappel des principaux résultats et mettra en perspective leurs apports mais également leurs limites. Si les preuves expérimentales en faveur d'un processus spatial en mémoire épisodique sont nombreuses et intégrées dans les modèles, la nature de ce processus reste encore débattue. Nous présenterons alors une première perspective expérimentale ayant pour but de mettre en évidence un effet de la construction de scène sur la posture. Des tâches non mnésiques conceptualisées comme impliquant la construction de scènes pourraient être une piste de travail intéressante pour évaluer la sensibilité des indicateurs posturaux à ce processus de construction de scènes. Ensuite, nous présenterons quelques pistes de réflexion pour mettre au point un paradigme et proposer des mesures comportementales pour récolter des indices en faveur de la remémoration comme construction de scènes. En réponse aux limites soulevées au début de ce Chapitre, cette conclusion générale se clora sur l'intérêt des mesures qualitatives de la remémoration dans le cadre de notre hypothèse.

Chapitre 1

LA REMEMORATION

EPISODIQUE, UN PROCESSUS

SPATIAL ?

Il faut tout d'abord, différencier les effets spatiaux en mémoire épisodique, auxquels nous allons nous intéresser ici, de la mémoire spatiale proprement dite. La mémoire spatiale est définie comme la capacité à traiter l'espace et à le mémoriser pour pouvoir ensuite rappeler les caractéristiques spatiales de l'environnement. Le pointage de position d'objets, en test différé ou immédiatement après avoir fermé les yeux, est une tâche couramment utilisée pour évaluer la mémoire spatiale. D'autres tâches existent, comme par exemple une tâche de reconnaissance dans laquelle il faut différencier l'arrangement d'objets appris d'autres patterns obtenus avec les mêmes objets. Le point commun entre ces tâches est qu'elles portent toujours sur une notion de position d'objets, qu'elle soit par rapport à une position de l'observateur dans l'espace ou par rapport à d'autres objets. Un effet bien connu en mémoire spatiale est celui de la supériorité du point de vue appris, qui se traduit expérimentalement par une réponse plus rapide et/ou plus précise lorsque le point de vue nécessaire pour effectuer la tâche est aligné à celui de l'apprentissage (Diwadkar et McNamara, 1997 ; Shelton et McNamara, 1997). La latence de réponse et la précision de la réponse, en fonction de la différence de position de l'observateur entre la condition de rappel et d'apprentissage, peuvent permettre d'émettre des hypothèses sur la nature du traitement spatial en jeu. Il faut noter cependant que l'expérience subjective lors du rappel n'est pas un trait servant à caractériser ce rappel.

Dans l'étude de la mémoire spatiale, le but est de mettre en évidence comment l'espace est traité et retenu dans le but d'expliquer la réalisation de certaines tâches spatiales comme la navigation. L'intérêt se porte donc sur le fait qu'une composante spatiale peut être apprise puis rappelée et non pas sur le fait que le rappel doit faire référence à un moment délimité dans le passé. En psychologie animale, par exemple chez le rat, l'apprentissage d'un chemin à travers un labyrinthe peut nécessiter plusieurs essais de familiarisation avec l'environnement et se

répartir sur plusieurs jours (Sharma, Rakoczy, Brown-Borg, 2010). La mémoire spatiale est un champ de recherche à part entière en psychologie humaine (et animale) qui s'intéresse également au rôle des informations en provenance du corps dans des tâches spatiales telle que la navigation (Huffman et Ekstrom, 2021).

L'hypothèse explorée dans cette thèse concerne le processus mis en œuvre pour faire référence à un moment précis dans le passé. Un souvenir épisodique est composé de divers éléments, dont l'information spatiale du lieu dans lequel se déroule l'épisode rappelé. L'étude du processus de remémoration soulève alors la question de la place qu'occupe cette information spatiale. Lorsqu'un effet spatial en mémoire épisodique est expérimentalement démontré, deux explications sont alors envisageables. La première consiste simplement à supposer que, comme le lieu du souvenir a été encodé, les effets spatiaux observés en mémoire spatiale s'observent également dans le cadre d'un souvenir seulement de par la nature de l'information. Dans ce cadre, les expériences s'intéressent alors à comment l'espace est encodé puis rappelé, sans forcément supposer que son intégration dans un épisode lui donne un statut particulier. La seconde explication, au contraire, suppose que les effets spatiaux observés lors de la remémoration épisodique sont dus à la présence d'un processus spatial ayant lieu lors de la remémoration. En effet, la mise en évidence d'une structure commune, qu'est l'hippocampe, pour la résolution de tâches spatiales et la remémoration épisodique (Burgess, Maguire et O'Keefe, 2002) a suggéré que le statut de l'information spatiale était peut-être différent de celui d'autres composantes en mémoire épisodique (e.g., quoi ? qui ? etc.).

Pour mettre en évidence que la mémoire épisodique nécessite un processus spatial, il faut arriver à montrer que le spatial n'est plus seulement un contenu, indépendant des autres, mais que des manipulations spatiales peuvent avoir des conséquences sur des composantes non spatiales de la mémoire épisodique. Dans ce cas, la composante spatiale n'a plus le même statut que les autres composantes de l'épisode puisqu'à travers elle des modifications sur des composantes non spatiales peuvent être expérimentalement produites. Autrement dit, le but est de mettre en évidence que le contexte spatial peut améliorer ou détériorer le rappel d'autres aspects du souvenir. Ainsi, le contenu ciblé par le rappel ne peut pas être de nature spatiale dans le cadre du test de l'hypothèse d'un effet spatial en mémoire épisodique, car il ne serait alors pas possible de conclure sur la nature spatiale du processus de remémoration, mais seulement sur la présence d'une composante spatiale dans l'épisode rappelé.

La première partie de ce Chapitre a pour but de mettre en lumière les différents arguments en faveur d'un rôle particulier du contexte spatial dans la remémoration. Nous verrons que

certain arguments relèvent de la preuve d'une composante spatiale (i.e., le lieu du souvenir), mais que d'autres permettent d'envisager un processus spatial en mémoire épisodique même si aucune composante spatiale ne doit être rappelée. Nous examinerons ensuite comment les modèles de la mémoire épisodique rendent compte de ces effets spatiaux et les résultats expérimentaux qu'ils peuvent ou non prédire. En effet, en miroir du faisceau de preuves expérimentales, certains modèles ne rendent compte que d'une composante spatiale qui a le même statut que les composantes d'une autre nature de l'épisode (e.g., contenu factuel, émotionnel, etc.), alors que d'autres modèles proposent qu'un processus spatial soit à l'œuvre durant la remémoration. Nous mettrons particulièrement l'accent sur le modèle de Maguire et collaborateurs (Hassabis et Maguire, 2007 ; McCormick et Maguire, 2021) qui essaye de s'extraire de la notion de stockage pour proposer une vision en termes de processus communs pour différentes tâches cognitives impliquant l'hippocampe. Cependant, comme nous l'aborderons à la fin de ce chapitre, les notions de construction ou de simulation en mémoire, qui remplacent celle de stockage, ont des conséquences sur la conceptualisation de la mémoire, notamment du sentiment d'épisodicité, ou même plus largement sur l'appréhension de la cognition.

I- Effets spatiaux de contenu et de processus en mémoire épisodique

A) L'importance du contexte spatial de par la définition d'un souvenir épisodique

Si l'on considère la définition de la mémoire épisodique, il s'agit de la capacité de se souvenir d'événements passés spatio-temporellement délimités. La remémoration de ces épisodes s'accompagne du rappel de nombreux détails comme les personnes présentes, les émotions ressenties, le lieu dans lequel se déroule l'événement, etc. (Nyberg, McIntosh, Cabeza, Habib, Houle et Tulving, 1996). Cette remémoration est accompagnée d'une sensation de revivre l'événement, comme si nous étions projetés dans le passé. Tulving (2002) propose de concevoir la remémoration épisodique comme un voyage mental dans le temps et dans l'espace. En effet, le contexte spatial et nécessairement temporel de l'événement remémoré est différent de celui expérimenté dans le présent et pourtant, lors de la remémoration épisodique, nous avons la possibilité de ré-expérimenter un contexte perceptiblement absent.

Cet accès au contexte d'apprentissage (i.e., l'environnement dans lequel l'événement a été vécu) est également un critère qui permet de différencier la mémoire épisodique de la mémoire sémantique. Sa présence est associée à une remémoration épisodique. En effet, lors

du rappel de connaissances générales sur le monde, les informations autres que le contenu ne sont pas rappelées. La mémoire sémantique peut faire référence à un ensemble d'occurrences et n'est donc plus limitée à un épisode spatio-temporellement défini. Par exemple, les connaissances sur ses propres préférences (e.g., j'aime le chocolat) ou sur des objets du monde (e.g., un chat a quatre pattes et est doux) se réfèrent à une multitude d'épisodes similaires qui n'ont pas forcément le même contexte spatio-temporel. C'est indépendamment du lieu et du moment de l'apprentissage, des personnes présentent à ce moment-là, etc. que la connaissance est rappelée (Irish et Piguet, 2013).

Ainsi de par la définition même de la mémoire épisodique, la possibilité de rappeler des détails contextuels renvoyant à un moment passé précis et unique serait le marqueur d'un rappel basé sur la mémoire épisodique. La dimension temporelle est donc cruciale ici, non pas en raison de ses caractéristiques chronologiques, mais parce que l'évocation doit correspondre à un moment unique dans le temps. L'absence de détails contextuels et de caractérisation comme un moment spatio-temporellement unique indiquerait plutôt une implication de la mémoire sémantique. Expérimentalement, il est donc possible de différencier ces deux types de rappel en demandant aux participants de décrire le plus précisément possible leur souvenir. Grâce à la quantité de détails associés au souvenir, mais également grâce à la nature de ces détails, il est ainsi possible de qualifier le souvenir de contextualisé ou de décontextualisé et de juger de sa spécificité (e.g., protocole d'interview autobiographique, voir Levine, Svoboda, Hay, Winocur et Moscovitch, 2002). Il est également possible de questionner, à partir d'un contenu, sur son contexte d'apprentissage. Cette tâche de mémoire de source nécessite alors de faire référence au moment précis de l'apprentissage et d'avoir accès aux informations spatio-temporelles de l'épisode, distinctives quant au type de processus recruté pour répondre correctement à la question de la source.

B) De l'importance du point de vue dans l'expérience de remémoration : vers le contexte spatial comme organisateur d'épisodes

Le spatial en mémoire épisodique ne renvoie pas seulement à un contenu de l'épisode, mais implique également l'interaction que l'individu a entretenue avec l'environnement à un moment donné et le rappel de celle-ci. Ainsi, le point de vue duquel a été vécu l'événement est un indicateur de cette interaction au moment de l'encodage. Lorsque l'intérêt se porte sur les évaluations subjectives de la remémoration, le point de vue selon lequel est revécu l'épisode

tient alors une place importante. Phénoménologiquement, le souvenir peut être revécu à la première personne (i.e., point de vue acteur) ou à la troisième personne (i.e., point de vue observateur). Le point de vue acteur consiste en un rappel de l'événement à partir de la même position que celle occupée lors du déroulement original de l'événement, comme si l'individu revoyait par ses propres yeux l'action suivre de nouveau son cours à partir du même endroit dans l'espace. Si au contraire l'épisode est ré-expérencé selon les yeux d'une autre personne présente, ou même d'une position dans l'espace autre que celle d'un protagoniste, le rappel se fait donc d'un point de vue observateur. Dans ce cas, l'individu se revoit faire l'action comme s'il était hors de son corps, donc d'un point de vue différent de celui de l'apprentissage.

Plusieurs études se sont intéressées au potentiel lien existant entre le point de vue selon lequel est rappelé le souvenir et la présence de la sensation de revivre l'événement. Par exemple, French et Crawley (2005) ont demandé à des participants de rappeler des événements suite à un indice. Ces événements rappelés étaient évalués par les participants en termes de phénoménologie avec une procédure de *Remember-Know*, afin de distinguer les remémorations épisodiques d'autres formes de rappel. Ensuite, les participants devaient se souvenir de cet événement sous forme d'images, et préciser s'ils adoptaient un point de vue acteur ou observateur. Les résultats ont montré que les souvenirs associés à une sensation de voyage mental dans le passé étaient plus souvent revécus du point de vue acteur comparativement aux souvenirs ne générant pas ce phénomène de reviviscence. Ces résultats sont de nature corrélationnelle et il ne peut donc pas être établi un lien de causalité direct entre le point de vue de rappel et la sensation de revivre l'état expérencé lors de l'apprentissage. L'expérience de Marcotti et Jacques (2018) pallie cette limite en créant des cinq événements de laboratoire grâce à des jouets. Les participants étaient acteurs dans 24 scènes (e.g., pêcher des poissons et cuisiner des sushis). Une semaine après, les consignes de rappel variaient dans le but de manipuler le point de vue à adopter. Les résultats montrent que les événements rappelés avec un point de vue observateur sont évalués comme moins vivants et contiennent moins de détails. Cependant, il est impossible de savoir s'il s'agit d'un coût lié au changement de perspective lors du rappel ou d'un avantage du point de vue à la première personne lors de la remémoration. Pour dissocier ces deux explications, il est alors nécessaire de manipuler le point de vue lors de la réalisation de la tâche pendant l'apprentissage, l'utilisation de la réalité virtuelle permet ce type de manipulation expérimentale.

Grâce à la réalité virtuelle, Bergounian, Nyberg et Ehrsson (2014) génèrent une sensation d'être hors de son corps, car le participant peut se percevoir de face ou de profil. En effet, avec des caméras et un casque de réalité virtuelle, il est possible de modifier le point de

vue expérimenté par le participant pendant le déroulement d'un événement. Les résultats mettent en évidence que le rappel des événements encodés dans une situation de perspective observateur (i.e., le participant se voit de face) est coté comme moins épisodique (i.e., présence d'aspects temporels, spatiaux émotionnels) que le rappel des événements vécus du point de vue acteur (i.e., la réalité virtuelle n'est pas utilisée pour changer le point de vue réel). Les auteurs concluent donc que l'encodage d'événements doit nécessairement se faire du point de vue occupé par le corps pour permettre ensuite une remémoration épisodique. La question de l'importance du corps lui-même a donc été soulevée par Bréchet et collaborateurs (2019). En effet, l'intégration et le traitement des signaux sensoriels en provenance du corps ont été liés à la conscience qu'un individu a de lui-même. Dans leur expérience, les auteurs manipulent la présence d'informations corporelles congruentes lors de la présentation de l'événement en réalité virtuelle (e.g., lorsque l'individu lève son bras devant ses yeux, il peut effectivement voir son bras). Les résultats montrent que les performances mnésiques sont meilleures quand les informations corporelles sont présentes lors de l'encodage. Le bénéfice de la perspective à la première personne peut donc être modulé par des variables corporelles.

Le point de vue réexpérimenté lors du rappel, en plus d'être associé à la sensation de revivre, a également une influence sur d'autres qualités du souvenir. Par exemple, lorsque le participant est forcé de changer le point de vue du rappel, d'une perspective acteur vers une perspective observateur, les indices émotionnels et sensoriels sont rapportés moins vivaces que lorsque l'épisode devait être rappelé d'une perspective acteur (Berntsen et Rubin, 2006). McIsaac et Eich (2002) supposent que le point de vue du rappel pourrait également influencer le contenu rappelé de l'épisode. Les résultats montrent en effet que le contenu de l'épisode rappelé varie en fonction de la perspective que le participant a pour consigne d'adopter pendant le rappel. Lorsque le même point de vue qu'à l'apprentissage est utilisé pour le test, les sensations physiques ressenties, les réactions émotionnelles, les références à la première personne et l'état de l'individu pendant l'apprentissage sont plus présents qu'en condition de perspective observateur. Lorsque la remémoration se fait d'un point de vue observateur, ce sont les actions, l'apparence extérieure de l'individu, et les références à la troisième personne qui sont présentes en plus grand nombre contrairement à la condition de perspective acteur. La position de l'individu dans le contexte spatial de l'épisode semble donc jouer un rôle dans le contenu de la remémoration. Cependant, la nature de ce rôle n'est pas encore bien conceptualisée en raison de la difficulté à dissocier l'effet du potentiel coût de transformation de la perspective encodée d'un effet de supériorité du point de vue expérimenté lors de l'apprentissage. Si les manipulations en réalité virtuelle peuvent modifier le point de vue spatial,

elles modifient également la notion d'agentivité et présence de soi dans la scène. L'utilisation de la réalité virtuelle ne permet donc pas une interprétation univoque en termes de point de vue spatial.

C) Les effets de contexte, au-delà de la compatibilité, une preuve expérimentale en faveur d'un rôle du contexte spatial dans l'organisation de la mémoire épisodique

Un des effets les plus connus en mémoire se rapportant au contexte spatial est l'effet de congruence du contexte. La congruence du contexte porte sur la compatibilité de contenu spatial entre la situation de rappel présente et l'événement passé. Quand un matériel expérimental est appris dans un contexte spatial donné, il est ultérieurement mieux rappelé lorsque le participant se trouve dans le même contexte que celui de l'apprentissage comparativement à une condition dans laquelle le participant doit rappeler le matériel dans un autre contexte. Par exemple, dans l'expérience des plongeurs de Godden & Baddeley (1975), les participants apprennent des mots soit sur terre soit sous l'eau. Les résultats en rappel libre montrent que les performances des participants sont meilleures lorsque l'apprentissage et le rappel sont effectués dans le même contexte, quel qu'il soit, par rapport à la situation où le contexte d'apprentissage et celui de remémoration sont différents. Ce paradigme expérimental peut être conceptualisé comme un rappel indicé par le contexte spatial d'apprentissage. Ainsi, le contexte favorise le rappel du contenu de l'épisode avec lequel il est congruent. Ces résultats sont donc une preuve en faveur de la présence d'une composante spatiale dans le souvenir. De plus, le contexte semble lier entre eux les différents éléments de l'épisode. Par exemple, Jonker, Dimsdale-Zucker, Ritchey, Clarke et Ranganath (2018) observent qu'un premier rappel d'une association entre un objet et un lieu ne favorise pas seulement le rappel ultérieur de cette association, mais facilite également le rappel des autres objets qui ont été associés à ce contexte pendant l'apprentissage. Le contexte dans lequel s'insère l'item semble être un bon prédicteur de la limite du bénéfice du rappel sur la performance mnésique ultérieure. Autrement dit, tous les items sont appris à la suite dans l'expérience, mais le rappel d'une association ne favorise pas toutes les autres équitablement, seuls les objets partageant le même contexte en bénéficient (i.e., *retrieval induced facilitation*).

Pour aller plus loin, il est possible de se questionner sur le statut de cette composante spatiale. A-t-elle une place similaire aux autres composantes (e.g., quoi ? qui ?) ou son rôle est-il différent ? Sheldon & Chu (2017) comparent des indices spatiaux à des indices thématiques en termes d'accès aux événements en mémoire. Les résultats montrent que les indices spatiaux

(e.g., salle de classe) amènent à retrouver plus rapidement un souvenir associé et mènent à l'évocation de plus de détails épisodiques comparativement à un indice thématique (e.g., voyages). Au contraire, les indices thématiques entraînent un plus grand nombre d'événements rappelés. Ces résultats laissent supposer que le contexte spatial joue un rôle important dans l'organisation et la distinctivité des événements en mémoire épisodique, et que le contexte spatial permettrait notamment d'accéder plus directement à des événements passés précis et détaillés.

Jusque-là, le contexte spatial a été étudié comme un contenu, pouvant par exemple servir d'indice au rappel. Cependant, avec les résultats de Sheldon & Chu (2017) il devient envisageable que le contexte spatial soit plus qu'un contenu et qu'il puisse servir à distinguer les épisodes en mémoire. Autrement dit, si les indices spatiaux entraînent un rappel d'événements spécifiques détaillés, cette information du contexte spatial pourrait-elle être utilisée pour segmenter, au moment de l'apprentissage, le temps continu en épisodes différents ? Horner, Bisby, Wang, Bogus et Burgess (2016) adressent expérimentalement cette question des critères utiles pour créer un épisode. Un épisode est défini comme un événement délimité dans le temps par un début et une fin et est supposé être l'unité de stockage en mémoire épisodique. Le temps étant continu, la question des critères qui permettent le découpage d'un épisode se pose alors, car le temps n'a ni début ni fin en soi. Les résultats montrent que les indices spatiaux sont utilisés pour regrouper les stimuli entre eux ou au contraire les dissocier. Dans cette expérience, les participants explorent une succession de pièces dans un environnement virtuel et dans chaque pièce sont positionnées deux images. La phase d'apprentissage consiste donc en une exploration de ces pièces et la présentation de ces images. Pendant la phase de rappel, le participant doit reconnaître quelle image vient après (ou avant) celle présentée. Les résultats montrent que les participants réussissent mieux la tâche quand la bonne réponse est une image présente dans la même pièce comparativement à une pièce différente. Le temps de trajet entre les images et le temps de visibilité de chaque image ont été contrôlés. Autrement dit, les images d'une même pièce sont aussi éloignées l'une de l'autre qu'elles le sont de la précédente et de la suivante qui se situent dans une pièce différente, mais leur appartenance à un même contexte spatial module les performances en mémoire.

Ainsi, les indices spatiaux ne sont pas seulement utiles pour la mémorisation de la composante spatiale de l'épisode, mais ont également un rôle en lien avec la composante temporelle du souvenir épisodique (i.e., l'ordre dans lequel a été vu les stimuli pour la première fois). Autrement dit, même lorsque l'élément à rappeler n'est pas spatial, le contexte spatial de

l'apprentissage joue un rôle non négligeable dans la modulation des performances en ce qu'il permet de définir l'unicité de l'épisode. Ces résultats peuvent ainsi être interprétés comme une segmentation spatiale des événements en mémoire. En effet, les images présentées au sein d'une même pièce seraient associées dans un seul épisode et la présentation de l'une permettrait le rappel de l'autre. Par contre, les images présentées dans deux contextes spatiaux différents appartiendraient à deux épisodes distincts et la présentation de l'une n'aiderait pas au rappel de l'autre, et ce même si le temps qui s'écoule entre chaque image est identique.

Il est maintenant possible de conceptualiser une remémoration épisodique plus seulement comme le rappel d'un événement lointain dans le temps, mais comme tout rappel ne s'effectuant pas dans le même contexte spatio-temporel. Dans cette optique, Zacks, Speer, Swallow, Braver et Reynolds (2007) reprennent la définition d'un épisode comme un segment temporel avec un début et une fin se déroulant dans un lieu donné et qui est perçu par un observateur. Déjà dans cette définition la double caractérisation par le temps et le contexte spatial se détache. Donc, si un épisode se définit aussi par des frontières spatiales et non plus uniquement temporelles, le temps qui s'écoule entre l'apprentissage et le rappel n'est plus le seul critère pertinent pour engendrer la remémoration épisodique. Ainsi, le changement de contexte spatial pourrait expérimentalement générer un découpage du temps continu en deux épisodes distincts. De ce fait, le rappel du contenu d'un épisode qui se déroule dans un autre environnement spatial que celui expérimenté dans le présent nécessiterait de faire appel à la mémoire épisodique, que cet épisode ait eu lieu il y a dix minutes, une heure ou un jour. Il est intéressant de noter cependant que d'autres approches de la segmentation d'un monde continu en événements distincts sont disponibles. Par exemples, Reynolds, Zacks et Braver (2007) proposent que lors de la perception (et par la suite en mémoire, Zacks et collaborateurs, 2007) l'individu segmente les événements lors d'erreurs de prédiction. En effet, comme le traitement cérébral est supposé prédictif par nature, une erreur dans la prédiction d'actions ou de faits pourrait signifier une modification assez importante dans les caractéristiques environnementales pour indiquer un changement d'épisode (bien que l'opérationnalisation de cette idée soit parfois confondue avec une notion temporelle, e.g., Ezzyat et Davachi, 2010).

II- Comment les modèles de la mémoire épisodique ont-ils intégré le traitement spatial ? D'un contenu spatial à un processus spatial.

Certaines théories de la mémoire épisodique ne confèrent pas de statut particulier au contexte spatial du souvenir (Hirshhorn, Grady, Rosenbaum, Winocur et Moscovitch, 2012 ;

Kim, Borst, Thompson, Hopkins, Kosslyn et Squire, 2013). Il s'agit alors d'une composante parmi d'autres qui compose l'épisode rappelé. Ces théories supposent alors que les événements vécus sont stockés au niveau de l'hippocampe. Les effets de congruence du contexte sont expliqués par le fait qu'une partie de l'épisode a été présentée au moment du rappel ce qui aide à retrouver l'épisode entier en mémoire (i.e., tous les composants auquel le contexte est lié). Ce phénomène ne serait alors pas différent d'un rappel indicé sur une autre caractéristique comme par exemple le contenu (e.g., rappeler un anniversaire), la valence émotionnelle (e.g., rappeler un épisode joyeux) ou les personnes présentes (e.g., rappeler un événement qui s'est déroulé avec votre famille). Dans ce cas, le contexte spatial est un élément parmi d'autres qui est encodé puis stocké, sa présence aidant ensuite à la récupération des différents épisodes dans lequel il est présent. Quant à l'implication de l'hippocampe dans des tâches spatiales, ces théories proposent que des sous-parties différentes de l'hippocampe soient responsables de ces deux types de traitement (Hirshhorn et collaborateurs, 2012). Dans ce cas, il n'est alors pas nécessaire de supposer de points communs entre tâches spatiales et remémoration épisodique. Ces modèles de stockage ne seront pas développés plus en avant ici, car ils ne peuvent pas expliquer, à cause du statut supposé équivalent de tous les composants de l'épisode, comment le contexte spatial peut avoir un effet crucial sur la remémoration d'autres composantes du souvenir (i.e., un effet qui va plus loin qu'une simple association entre les éléments spatiaux et non spatiaux de l'épisode).

Tous les modèles présentés par la suite ont un point commun : ils basent leurs réflexions sur la présence d'une activation hippocampique dans des tâches spatiales. L'hippocampe semble jouer un double rôle : un rôle mnésique, comme le prouve son activation pendant des tâches de mémoire épisodique (Dickerson et Eichenbaum, 2009) et le déficit mnésique qui est généré par sa lésion (l'amnésie antérograde, soit l'incapacité à rappeler les événements qui sont survenus après la lésion est rapportée dès 1957 par Scoville et Milner) ; un rôle spatial, comme l'indique son activation durant les tâches spatiales (Maguire, Woollett et Spiers, 2006) et les difficultés à résoudre des tâches spatiales que rencontrent les patients amnésiques (Spiers, Burgess, Hartley, Vargha-Khadem, O'Keefe, 2001).

La distinction entre les modèles se fait principalement par le rôle qu'ils accordent à l'hippocampe et au réseau impliqué lors de la remémoration. Certains n'accordent à l'hippocampe qu'une étape de traitement spatial envisagée comme présente lors de l'encodage (et une simple réactivation lors de la remémoration) en mémoire épisodique. D'autres accordent à un processus spatial, soutenu par l'hippocampe, une place centrale dans la récupération et

plus seulement une réactivation passive du résultat d'un traitement effectué à l'apprentissage. Les études en IRMf sont donc nombreuses car elles permettent de poser des hypothèses en termes d'activation d'un réseau d'aires cérébrales lors de tâches épisodiques. Ainsi, les patients amnésiques deviennent une population privilégiée pour tester les hypothèses de chaque modèle, car la nature des déficits attendus lors d'une lésion de l'hippocampe diffèrent.

A) La théorie de l'hippocampe comme carte cognitive : le contenu spatial de l'épisode est responsable de l'implication de l'hippocampe pendant la remémoration

La théorie de l'hippocampe comme carte cognitive met en avant le rôle de l'hippocampe dans le traitement spatial et s'inspire directement des résultats mettant en évidence une activation hippocampique chez le rat lors de tâches de navigation. En effet, des études en neurophysiologie chez le rat ont montré que certains neurones hippocampiques nommés ensuite cellules de lieux (i.e., *place cells*) codent spécifiquement pour des endroits précis de l'environnement, indépendamment de l'orientation du rat dans cet environnement (O'Keefe, 1976). Ces cellules semblent également insensibles à des manipulations sensorielles de type présence/absence de lumière, sons ou stimulations tactiles (e.g., le sol sous les pattes du rat est doux, rugueux...). Ces résultats sont donc interprétés comme des preuves anatomiques d'un traitement de l'espace de nature allocentré par l'hippocampe. Le traitement spatial allocentré consiste en un codage de la position des objets dans l'environnement les uns par rapport aux autres sans tenir compte du point de vue de l'individu (i.e., la direction de son regard). Par exemple, la position d'un canapé peut être qualifiée par rapport à la position de la télévision, et dans ce cas, le canapé sera toujours face à l'écran, quelle que soit la position de l'individu dans la pièce et quel que soit l'angle duquel il regarde ces deux objets. L'environnement serait donc représenté sous forme de carte et l'activation d'une cellule de lieu indiquerait où se situe l'individu dans l'environnement, un peu comme une croix sur la carte qui indiquerait « vous êtes ici ». Dans ce type de traitement de l'espace, l'orientation de l'individu n'a aucune importance, c'est-à-dire que, quelle que soit la direction dans laquelle l'individu se tourne, la même activation sera mesurée. Là encore, l'analogie de la carte est pertinente, car une carte ne renseigne jamais l'orientation de celui qui la regarde et est toujours présentée par convention avec le Nord en haut.

Selon la théorie de la carte cognitive (O'Keefe, 1990), lors de l'exposition de l'individu à un nouvel environnement, les cellules de lieux qui répondent à différents endroits de cet

environnement créent de nouveaux liens entre elles. Une carte cognitive allocentrée de l'environnement est donc créée et stockée dans l'hippocampe sous la forme d'un nouveau réseau de cellules de lieux. Grâce à cette carte hippocampique qui n'est autre que la représentation interne de l'environnement externe, l'individu pourra par la suite naviguer efficacement dans les lieux cartographiés (i.e., déjà explorés). Burgess, Recce et O'Keefe (1994) proposent un mécanisme qui permettrait d'expliquer la possibilité qu'a le rat de naviguer dans l'espace d'un point à un autre à partir d'informations allocentrées. Dans le cadre de la mémoire épisodique, ce traitement spatial allocentré a été effectué sur l'environnement dans lequel l'événement se produit. Ainsi, une carte allocentrée est disponible pour chaque contexte spatial des événements en mémoire. L'activation de l'hippocampe pendant une tâche de mémoire épisodique peut donc s'expliquer par la réactivation de la carte correspondant au lieu dans lequel l'événement s'était déroulé. L'implication de l'hippocampe se limiterait donc à une composante spatiale dans l'épisode qui est stockée puis réactivée. Le traitement spatial est ici supposé lors de l'encodage, la remémoration ne nécessitant aucun processus spatial, seulement une réactivation du produit du traitement effectué à l'encodage.

Ce codage allocentré (i.e., des relations entre objets indépendamment de l'observateur) est très intéressant dans le cadre d'un souvenir à stocker, car il est immuable et ne dépend pas de la position de l'observateur dans l'environnement. Ainsi, même si l'individu se déplace dans l'environnement et expérience plusieurs orientations lors de son exposition à l'environnement, une seule carte allocentrée est correcte pour représenter cet environnement. Ce code est unique et est donc compatible avec l'idée d'une limitation en termes de quantité d'informations pouvant être stockées dans l'hippocampe. De plus, ce rôle éminemment spatial de l'hippocampe rend compte des troubles des patients amnésiques à effectuer des tâches en lien avec la représentation spatiale allocentrée de l'environnement (Burgess, Maguire et O'Keefe, 2002). Le lien supposé ici entre le traitement spatial et la remémoration épisodique n'est autre qu'une réactivation d'un contenu de nature spatiale, stocké dans l'hippocampe. En résumé, l'activation hippocampique lors du rappel d'événements passés serait due à la réactivation du contenu spatial de l'épisode qui est stockée dans cette structure. Le contenu spatial de l'épisode est un produit du traitement spatial allocentré effectué sur l'environnement lors de l'encodage.

Cette théorie échoue cependant à expliquer la phénoménologie, c'est-à-dire la sensation de revivre l'événement à la première personne. En effet, si seule une carte allocentrée est stockée, comment lors de la remémoration le point de vue peut-il être rejoué ? Il est important de noter que la remémoration est conceptualisée comme une simple relecture du contenu stocké.

Ici, le réseau de cellules de lieux se réactive et donne accès à la carte allocentrée de l'environnement qu'il représente. Ainsi, il n'est pas possible de ré-expérimenter le point de vue de l'apprentissage car il n'a pas été stocké en mémoire. Le point de vue ne peut donc pas être rejoué par la réactivation de neurones car il n'a pas été encodé. Il est néanmoins possible de faire l'hypothèse que tous les points de vue peuvent être recalculés à partir d'une carte allocentrée, en extrayant les informations de relations entre un point dans cette carte et les différents objets cartographiés (O'Keefe, 1990). Cependant, s'il n'y a aucune trace du point de vue d'apprentissage, autrement dit s'il n'est pas repéré au niveau de la carte allocentrée stockée, il est impossible de prédire que la remémoration se fera dans la majorité des cas avec une perspective d'acteur, c'est-à-dire du point de vue duquel l'événement a été vécu la première fois. En effet, sans trace du point de vue ou de la position de l'individu dans la carte allocentrée lors de l'exposition à l'environnement, une infinité de points de vue sont possibles et équiprobables. De plus, même en mémoire spatiale, les environnements naturels auxquels l'individu est exposé régulièrement ont une orientation préférentielle, utilisée pour résoudre des tâches spatiales (Marchette, Yerramsetti, Burns et Shelton, 2011). Ces résultats suggèrent un statut particulier du point de vue que le traitement purement allocentré de l'environnement ne peut expliquer.

Une des difficultés à l'application de ce modèle en psychologie cognitive expérimentale est qu'il repose presque exclusivement sur des données en neurophysiologie chez le rat, le singe ou d'autres espèces animales (pour une discussion des différentes limites à l'application de la théorie de la carte cognitive voir Eichenbaum, Dudchenko, Wood, Shapiro et Tanila, 1999). Ce modèle continue cependant d'évoluer et Epstein, Patai, Julian et Spiers (2017) proposent même de l'appliquer à la représentation des espaces sociaux ou abstraits et à la navigation dans le passé et le futur.

B) La théorie multi-traces (MTT) : l'hippocampe comme index, structure de liaison entre les composantes mnésiques

Cette théorie ne se propose plus seulement d'expliquer l'activation de l'hippocampe lors d'une tâche mnésique, mais il modélise le processus de remémoration épisodique. À l'encodage, l'hippocampe encode rapidement et sans exception toutes les informations de contenu de l'épisode. Il crée, sur la base d'un apprentissage unique, des liens entre l'hippocampe et les zones corticales activées en parallèle, qui représentent les composants de différentes natures de l'épisode (Moscovitch et collaborateurs, 2005). Un renforcement des

liens entre les zones corticales est prévu par le modèle, mais celui-ci est de faible ampleur. Ainsi l'hippocampe est donc la structure qui fournit une charpente spatiale qui lie, suite à une seule exposition à l'événement, tous les éléments présents dans l'épisode. Le stockage de chaque composante du souvenir étant lui distribué dans différentes parties du cortex. L'hippocampe réactive, par diffusion d'activation lors de la remémoration, tous ces éléments pour que leur rappel soit spatialement cohérent (Moscovitch et Nadel, 1998). Il est donc conceptualisé comme un index d'épisodes, qui permet la réactivation de tous les éléments de nature différente composant l'épisode. Le réseau impliqué dans la remémoration est donc beaucoup plus large que l'hippocampe seul.

L'avantage de ce modèle, par rapport à la théorie de la carte cognitive, est qu'il intègre la notion de consolidation puis de sémantisation du souvenir. Ces concepts sont centraux dans la prédiction des déficits observés chez les patients amnésiques en particulier la frange d'amnésie rétrograde, d'ampleur variable en fonction des individus, qui consiste en un oubli des événements ayant précédé la lésion, de quelques jours à quelques années. Si l'hippocampe est considéré comme un stock, que ce soit des lieux dans lesquels se sont déroulés les souvenirs ou des souvenirs eux-mêmes, sa destruction devrait entraîner la disparition de tous les épisodes sans distinction. Comment expliquer alors la conservation des événements qui précèdent largement dans le temps la lésion ? La théorie multi-traces postule que le stockage de l'épisode en mémoire est distribué, l'hippocampe n'est plus conceptualisé comme l'unique lieu de stockage des épisodes, sa lésion ne prédit donc plus la perte totale de tous les épisodes en mémoire. De plus, ce modèle prévoit une consolidation du souvenir grâce à laquelle les liens entre les éléments du souvenir codés au niveau cortical se renforcent. Cette consolidation pourrait avoir lieu pendant le sommeil (Stickgold, 2005) et correspondrait à des réactivations hippocampiques spontanées du réseau impliqué lors de l'apprentissage (Ego-Stengel et Wilson, 2010).

Ainsi, lors de la lésion de l'hippocampe, des liens cortico-corticaux permettraient de récupérer les différents éléments qui composent un épisode, mais sans la sensation subjective de revivre l'événement passé. Contrairement au modèle traditionnel de consolidation, qui suppose que l'activation hippocampique n'est plus nécessaire pour la récupération d'épisodes très anciens (représentés uniquement au niveau cortical), la théorie multi-traces suppose que l'hippocampe est toujours actif lors de la remémoration épisodique même lorsqu'il s'agit d'épisodes très anciens (pour une preuve expérimentale en imagerie voir Viard et collaborateurs 2007). Autrement dit, les liens cortico-corticaux seraient insuffisants pour générer une remémoration de l'épisode, c'est-à-dire pour générer la sensation de revivre un événement

unique dans le temps et l'espace. En effet, Nadel et Moscovitch (1997) supposent que l'hippocampe joue un rôle dans la sensation de reviviscence qui est associée à la remémoration épisodique de par son implication dans le rappel des détails spatiaux. Sans une implication hippocampique le contenu peut être rappelé sans que la qualité épisodique du souvenir puisse être expérimentée (voir Nadel, Winocur, Ryan, Moscovitch, 2007 pour une opposition des prédictions du modèle standard de consolidation et de la théorie multi-traces).

La notion de contexte spatial est ici à la fois traitée comme un contenu, un souvenir épisodique a un contexte spatio-temporel associé, mais également comme un organisateur des épisodes. En effet, l'hippocampe est à la fois responsable du stockage du contexte spatio-temporel et est également la structure qui indexe les différents épisodes et permet donc leur distinction les uns des autres. De plus, le statut de cette notion de contexte spatio-temporel a quelque chose de particulier par rapport aux autres composantes car lorsque l'hippocampe est lésé, ce n'est pas seulement le contexte spatio-temporel de l'épisode qui est perdu, mais aussi l'épisodicité de la remémoration.

À l'instar de la théorie de la carte cognitive, la remémoration épisodique à la première personne n'est pas expliquée. En effet, la nature allocentrée des informations spatiales encodées et stockées par l'hippocampe n'est pas remise en cause dans ce modèle. Ainsi, la remémoration à partir du point de vue d'apprentissage n'est pas non plus prédite par ce modèle. Cependant, la phénoménologie en mémoire épisodique n'est pas seulement soutenue par des études corrélationnelles en psychologie cognitive, mais est également congruente avec un second type de traitement spatial observé dans l'hippocampe du rat grâce à des études de neurophysiologie. En effet, lors de l'enregistrement de l'activité neuronale dans l'hippocampe du rat, des cellules codant pour la direction de la tête ont été mises en évidence (Taube, Muller, Ranck, 1990). Ces *head direction cells* répondent spécifiquement à l'orientation du rat dans l'environnement, quelle que soit sa position dans celui-ci (O'Keefe, Burgess, Donnett, Jeffery et Maguire, 1998). Pour une même position, en fonction du point de vue du rat, différentes cellules hippocampiques s'activeront. Ce type de codage n'est pas congruent avec une vision purement allocentrée du traitement hippocampique de l'espace.

C) Le modèle de Byrne, Burgess et Becker (BBB) : la notion de spatial comme contenu et comme traitement à l'encodage et à la récupération

Le modèle BBB intègre dans la conception de la mémoire épisodique les deux types de codage de l'espace enregistré au niveau des cellules hippocampiques du rat, à savoir le traitement spatial allocentré et le traitement de l'orientation de l'individu dans l'environnement dit égocentré. Il propose donc de tenir compte de ce second codage qui ne serait pas absolu et dépendrait du point de vue qu'a l'individu dans un environnement donné. Ainsi, la position des objets pourrait être codée par rapport à la position du sujet dans l'environnement et non plus seulement de manière absolue par les relations qu'entretiennent les objets entre eux. Le codage égocentré se faisant en fonction du point de vue de l'individu, les relations spatiales qu'il entretient avec les objets se modifient à chacun de ses déplacements. Par exemple, je pourrais dire que la télévision est en face de moi si je me trouve sur le canapé alors que lorsque je me trouve au niveau de l'entrée du salon la télévision est à ma droite. Ce codage est donc unique pour chacune des positions dans l'environnement et est donc compatible avec la ré-expérience du point de vue précis de l'apprentissage lors de la remémoration épisodique.

À lui seul, il est cependant peu adapté à un stockage à long terme. En effet, lorsqu'un environnement est exploré, de nombreux points de vue sont expérimentés, ce qui rend le codage spatial égocentré peu adapté à un stockage à long terme du fait de sa multiplicité. En effet, une limite des capacités de stockage en mémoire est communément admise. Le modèle BBB propose donc d'associer le codage allocentré et le codage égocentré pour une adéquation à la fois avec l'idée de stockage d'une composante spatiale unique et d'une phénoménologie à la première personne lors de la remémoration. Burgess, Spiers et Paleologou (2004) testent, dans le cadre ici de la mémoire spatiale, la présence des deux types de traitements, égocentré et allocentré. Dans cette expérience, les participants voient un pattern d'objets et doivent ensuite désigner lequel à bouger lors de la présentation ultérieure du pattern. Les résultats montrent que les performances de position d'objets sont améliorées lors de la présence d'un indice externe stable dans l'environnement (i.e., un objet dont la localisation ne change pas pendant toute la durée de l'expérience). De la même manière, la congruence de point de vue entre l'apprentissage et le rappel facilite le jugement de position des objets. De plus, Waller et Hodgson (2006) démontrent que lorsque l'individu est désorienté dans son environnement (i.e., tel que révélé par des erreurs de localisation des objets par rapport à lui-même), il peut effectuer une tâche spatiale centrée sur les objets et que la performance à cette tâche sera même améliorée

par la perte d'orientation dans l'environnement. En effet, l'individu ne serait alors plus obligé d'ignorer sa propre position pour traiter la relation entre deux objets. Ces résultats mettent en évidence la présence d'une carte allocentrée, mais également sa coexistence avec un traitement égocentré de l'environnement puisque la désorientation (i.e., la perte du codage de son point de vue dans l'espace) a un effet sur les performances à cette tâche purement allocentrée. Burgess (2006) résume les différentes preuves en faveur de chacun des deux types de traitement en faisant l'hypothèse de leur coexistence en mémoire spatiale et conclut en soulevant la question de leur implication respective dans des tâches mnésiques.

Dans le modèle de Byrne, Becker et Burgess (2007), le stockage à long terme du contenu spatial en mémoire épisodique est envisagé sous format allocentré de par son unicité. Ainsi, ce modèle reste compatible avec l'idée originale de l'hippocampe comme carte cognitive. Cependant, la conceptualisation d'un processus de transformation des informations spatiales lors de l'encodage et lors de la remémoration rapproche ce modèle de l'hypothèse d'une implication d'un processus spatial en mémoire épisodique. Lors de l'encodage, l'information spatiale acquise grâce aux systèmes sensoriels est de nature égocentrée. En effet, la vision permet par exemple de coder la relation des objets par rapport à soi. Cette information égocentrée, issue de la multitude de points de vue expérimentés, serait traitée au niveau pariétal. Une représentation égocentrée de l'environnement serait disponible pour permettre par exemple de planifier un chemin en l'absence d'input sensoriel (i.e., navigation mentale). Le lobe médio-temporal permettrait de manipuler des informations allocentrées, indépendantes de la position de l'observateur dans l'environnement. Les auteurs émettent l'hypothèse qu'un processus de transformation temporo-pariétal, désigné ensuite sous le nom de *fenêtre pariétale*, permet le passage d'un type d'information à l'autre. Lors de l'encodage, les informations égocentrées (issues d'une intégration sensorielle) sont transformées en carte allocentrée qui sera stockée à long terme dans l'hippocampe. Lors de la remémoration, la fenêtre pariétale permet la transformation inverse. À partir de la carte cognitive allocentrée, il est possible de recréer un point de vue à la première personne. Il y a donc dans la carte allocentrée des informations sur le ou les points de vue expérimentés précédemment pour pouvoir par la suite transformer le code allocentré en code égocentré. Dans ce modèle, la notion de *spatial* est donc à la fois un contenu de l'épisode, qui se déroule dans un contexte spatial stocké à long terme sous forme de carte allocentrée, mais également un processus spatial mis en jeu à la remémoration, qui permet la reconstruction du point de vue de l'apprentissage à partir de la carte allocentrée. La remémoration épisodique n'est donc plus totalement conçue comme une réactivation à

l'identique d'un contenu stocké au préalable, mais implique des opérations de recréation, sur un contenu de nature spatiale.

Comme évoqué au début de ce chapitre, l'étude de la réalisation de tâches spatiales chez des patients amnésiques atteints d'une lésion limitée à la région hippocampique est un des moyens pertinents pour définir, chez l'humain, quel type de traitement spatial est impliqué en mémoire épisodique. Ainsi, le traitement déficitaire sera celui supposé associé au rôle de l'hippocampe dans la réalisation des tâches spatiales et mnésiques. King, Burgess, Hartley, Vargha-Khadem et O'Keefe (2002) comparent dans une tâche de reconnaissance immédiate de position d'objets les performances d'un patient amnésique, Jon, à celles de participants contrôles. Dans cette tâche, le participant voit un environnement virtuel d'un certain point de vue et doit apprendre la position d'un à quinze objets. Il doit ensuite reconnaître la position de chaque objet parmi trois. Cette tâche de reconnaissance peut s'effectuer soit du même point de vue que celui de l'apprentissage soit d'un point de vue différent. Pour réussir la tâche dans la condition même point de vue, les participants peuvent à la fois se baser sur un traitement égocentré (i.e., coder les positions des objets cibles par rapport à sa propre position dans l'espace) et sur un traitement allocentré (i.e., coder la position des objets par rapport aux relations qu'ils entretiennent avec des indices externes). Par contre, lorsque le point de vue change, seules les relations entre les repères stables de l'environnement et l'objet permettraient de repositionner correctement l'objet cible. Les auteurs émettent l'hypothèse que l'hippocampe jouant un rôle dans le traitement allocentré, Jon sera moins performant que les participants contrôles lorsque la tâche implique un changement de point de vue, car il n'a pas pu traiter les relations existant entre les objets et les repères stables de l'environnement. Au contraire, les performances de Jon devraient être équivalentes à celles des participants contrôles lorsque les points de vue d'apprentissage et de rappel sont identiques puisqu'ils peuvent se baser sur un traitement exclusivement égocentré de l'environnement. Les résultats sont en partie congruents avec cette hypothèse de déficit du traitement allocentré chez les patients amnésiques. En effet, dans la condition changement de point de vue, les performances de Jon sont au niveau du hasard et significativement différentes de la performance des sujets contrôles dès que plusieurs objets sont présentés simultanément à l'apprentissage. De plus, les performances de Jon sont meilleures dans la condition « points de vue identiques » que dans la condition « points de vue différents ». Les auteurs interprètent ces résultats comme un déficit du traitement allocentré lors d'une lésion hippocampique, ce qui est congruent avec l'hypothèse d'une carte cognitive allocentrée stockée à long terme par cette structure.

Cependant, les performances de Jon dans la condition « points de vue identiques » se différencient également significativement de celles des participants contrôles lorsque le nombre d'objets à rappeler atteint 10. Les auteurs suggèrent que cette différence de performances dans la condition « points de vue identiques » est due à la possibilité, pour les participants contrôles, de se baser, sur les deux types de traitement pour résoudre la tâche (i.e., allocentré et égocentré), ce que Jon ne peut pas faire à cause de sa lésion hippocampique. Autrement dit, son déficit du traitement allocentré le désavantage pour les essais où un grand nombre d'objets est présent, car il doit uniquement se baser sur une représentation égocentrée au lieu de la combiner avec une représentation allocentrée. Néanmoins, il est important de noter que les deux conditions ne sont pas de difficulté équivalente, comme le soulignent les auteurs. Ainsi, une hypothèse alternative serait de supposer un déficit du traitement égocentré qui est mis en évidence seulement lorsque la tâche devient aussi difficile que la tâche points de vue différents, donc quand le nombre d'objets augmente. Ce qui explique qu'une diminution des performances de Jon à la condition égocentrée soit mesurée lorsque le nombre d'objets est plus grand par rapport à la condition allocentrée.

Les déficits observés chez les patients amnésiques ne semblent cependant pas être restreints uniquement au codage allocentré. Ainsi, peut-être que ces deux types de traitement ne sont pas les seuls possibles ou qu'ils sont moins indépendants l'un de l'autre que conceptualisé jusque-là. Par exemple, Wang et Spelke (2000) démontrent que lorsque le traitement égocentré de l'orientation de l'individu dans l'espace est perturbé par une procédure de désorientation, les relations entre objets sont également affectées négativement. Ainsi, le codage des relations entre objets ne semble pas être totalement indépendant de la position de l'observateur dans l'environnement. De plus, en mémoire spatiale, un troisième type de traitement de l'espace est suggéré. La mise à jour égocentrée est définie comme un traitement spatial permettant de coder les relations des objets par rapport à soi tout en intégrant les informations issues du mouvement. Elle permet donc de suivre l'évolution des relations entre les objets et la position de l'observateur grâce à une actualisation de ces relations au cours du mouvement. Par exemple, lorsque je me trouve dans mon salon, je peux pointer mon doigt vers la position de la bibliothèque, et si je ferme les yeux et que je me déplace, je pourrais toujours pointer précisément mon doigt vers la bibliothèque. Cet exemple suggère que la vision n'est pas la seule information à la base de l'actualisation de sa position et de son orientation dans l'espace, mais surtout qu'un processus d'intégration multimodale particulièrement efficace semble être à l'œuvre dans le traitement de sa position par rapport à l'environnement. Ce concept de mise à jour est intéressant pour la mémoire épisodique car, dans le cadre d'un

traitement égocentré, la multitude de points de vue expérimentés à l'apprentissage engendre une variation des codages qui n'est pas compatible ni avec la notion de stockage ni avec l'unicité de la perspective à la première personne lors de la remémoration.

Farrell et Robertson (1998) ont démontré que la mise à jour de sa propre orientation dans l'espace (i.e., point de vue) suite à un mouvement est très efficace et automatisée. Leur étude est centrale dans le raisonnement qui amène à la conceptualisation d'un processus spatial en mémoire épisodique, nous ferons donc référence à cette expérience à plusieurs reprises dans la suite de cette thèse. Dans leur paradigme, le participant est assis sur une chaise au milieu d'un pattern d'objets qu'il a préalablement appris. Le participant subit à chaque essai une rotation passive (i.e., la chaise est tournée par l'expérimentateur) les yeux fermés. Suite à la rotation, le participant doit pointer vers les objets qui lui sont énoncés à voix haute. Plusieurs conditions de pointage sont comparées. La première est une condition sans déplacement, c'est-à-dire que la rotation effectuée ne génère aucun changement de point de vue (i.e., une rotation vers la droite est compensée par une rotation du même degré d'angle vers la gauche), suite à laquelle le participant doit pointer vers les objets cibles à partir du point de vue de départ (qui est le même que le point de vue d'arrivée). La seconde condition est une condition ignorée, c'est-à-dire que le participant subit une rotation qui génère un changement d'orientation, mais doit pointer vers les objets comme s'il n'avait pas bougé, donc selon son point de vue qui précède le mouvement (i.e., point de vue de départ). La troisième condition est une condition mise à jour où le participant subit une rotation et doit pointer en fonction de sa nouvelle orientation dans l'espace, donc en tenant compte de son déplacement. La dernière condition est une condition imaginée, dans laquelle le participant ne bouge pas et doit pointer les objets selon un autre point de vue que celui de départ, qui n'est pas atteint grâce à un déplacement, mais qui est imaginé. Si la mise à jour égocentrée est un processus automatique alors la condition de mise à jour devrait être plus facile que la condition ignorée. Au contraire si le mouvement n'est pas accompagné de l'intégration des informations sensorielles permettant l'actualisation de son orientation dans l'espace, ignorer son déplacement serait donc plus facile que d'en tenir compte pour pointer vers les objets. Les résultats concernant les latences de pointage et les erreurs en degrés indiquent que les pointages en condition mise à jour sont plus rapides et plus précis qu'en condition imaginée. Ces résultats vont dans le sens d'une automatisation de la mise à jour égocentrée avec le mouvement. Par ailleurs, lorsque les latences de pointage sont analysées en fonction de l'amplitude de la rotation, elles suivent le même pattern dans la condition imaginée et la condition ignorée, c'est-à-dire que plus l'angle de rotation augmente plus le temps de réponse augmente, comme si le participant simulait mentalement le déplacement (qui prend

plus de temps lorsque la distance à parcourir est plus grande). Cette augmentation des latences ne s'observe pas ni dans la condition mise à jour ni dans la condition sans changement d'orientation. Ces résultats vont encore une fois dans le sens d'une automatisation de la mise à jour. En effet, dans la condition ignorée, il semble que le point de vue ait été actualisé lors du mouvement, mais que, pour pouvoir répondre correctement à la tâche de pointage, le mouvement inverse doit ensuite être mentalement simulé pour pointer les objets cibles selon le point de départ.

Gomez, Rousset et Charnallet (2012) explorent la possibilité qu'un déficit de la mise à jour égocentrée puisse expliquer l'échec de la création d'une carte allocentrée chez les patients amnésiques, suite à une lésion hippocampique. Ainsi, la diminution des performances en condition allocentrée ne serait plus expliquée par un déficit du traitement allocentré en tant que tel, ce qui expliquerait le manque de clarté dans la dissociation mesurée chez le patient Jon (avec un déficit à la fois allocentré et égocentré). En effet, pour créer une carte allocentrée de l'environnement, les informations proviennent généralement des informations sensorielles égocentrées mises à jour lors du déplacement de l'individu dans l'environnement. Les patients amnésiques pourraient ainsi avoir des difficultés à intégrer des informations sensorielles liées à leurs mouvements dans l'environnement pour créer une carte allocentrée, mais pourraient peut-être le faire sur la base d'autres informations. Les résultats montrent que lorsque la tâche demande une intégration des informations sensorielles acquises pendant son propre déplacement pour réussir un rappel privé des indices externes stables de l'environnement, le patient amnésique M.R., impliqué dans cette première étude, est moins performant que les participants contrôles. À l'inverse, lorsque l'apprentissage met l'accent sur les repères externes de l'environnement, il est tout à fait possible pour M.R. de les réutiliser pour réussir la tâche au même titre que les participants contrôles. Dans une seconde expérience, les auteurs demandent de reproduire un déplacement sur une carte allocentrée suite à l'apprentissage d'un chemin. Les résultats montrent que M.R. est aussi performant que les participants contrôles pour créer cette carte lorsque l'apprentissage se concentre sur les indices stables de l'environnement. Au contraire, lorsque la création de cette carte passe par l'intégration des informations liées à son propre mouvement dans l'environnement, les participants contrôles réussissent significativement mieux que M.R.. Il semblerait que la diminution des performances des patients amnésiques à des tâches allocentrées ne soit pas due à un déficit du traitement allocentré en lui-même, mais plutôt à une difficulté à transformer les informations égocentrées en informations allocentrées.

Bien que les résultats aient été répliqués chez une patiente présentant une amnésie développementale (Gomez, Rousset, Bonniot, Charnallet et Moreaud, 2015), la force de l'hypothèse d'une implication de la mise à jour égocentrée en mémoire épisodique est qu'elle ne repose pas uniquement sur des données démontrant une perturbation dans le cas des participants amnésiques, mais également sur des expériences menées chez le sujet sain. Gomez, Rousset et Baciou (2009) comparent l'effet d'un apprentissage favorisant la mise à jour égocentrée à un apprentissage favorisant le traitement allocentré d'un environnement virtuel sur les performances en rappel. Tout d'abord, les résultats montrent un avantage de la condition d'apprentissage mise à jour égocentrée sur le nombre d'items rappelés par rapport à la condition d'apprentissage allocentré. Pour s'assurer que cet avantage était bien dû à un plus grand nombre de réponses basées sur une remémoration épisodique, les auteurs ont analysé les qualifications subjectives des réponses. Les résultats montrent que les réponses *remember* sont plus souvent présentes pour les items appris dans la condition mise à jour égocentrée que dans la condition allocentrée. Alors qu'il n'y a aucune différence significative du type d'apprentissage sur les réponses *know*. Autrement dit, la sensation de revivre le moment de l'apprentissage est plus présente quand l'apprentissage a favorisé la mise à jour que lorsqu'il a favorisé l'acquisition d'informations allocentrées. Ces résultats sont répliqués avec une tâche de reconnaissance, qui engendre un taux de bonnes réponses plus important que la tâche de rappel libre. Cette expérience met en évidence que la mise à jour égocentrée pourrait jouer un rôle au moment de l'apprentissage. Le contenu à rappeler n'est pas de nature spatial et permet donc d'interpréter les résultats en termes de processus spatial et non de contenu spatial en mémoire épisodique. Ainsi, l'implication du processus de mise à jour égocentrée à l'apprentissage semble favoriser la remémoration épisodique ultérieure. Ce processus est-il également présent lors de la remémoration ?

Cerles, Guinet, Rousset (2015) proposent alors de tester l'implication d'un processus spatial au moment de la remémoration. Cette mise à jour égocentrée pourrait être responsable de la recréation du point de vue lors du rappel. Le modèle BBB propose en effet un processus de transformation d'une carte allocentrée en un point de vue égocentrée grâce à la fenêtre pariétale (Byrne et collaborateurs, 2007). Si la mise à jour égocentrée est supposée entrer en jeu dans la remémoration épisodique, cette hypothèse ne prédit pas seulement une détérioration de la mise à jour égocentrée en parallèle de déficits de remémoration épisodique, comme dans le cas d'une amnésie, mais elle permet également de prédire une interaction entre une tâche spatiale nécessitant la mise à jour égocentrée et une tâche de remémoration épisodique chez le sujet sain. Autrement dit, la mise à jour égocentrée ne pourrait pas être impliquée simultanément

dans deux tâches distinctes sans apparition d'un coût (i.e., augmentation des temps de réponse ou diminution des performances). Ainsi, la performance à la tâche de remémoration épisodique et/ou la performance à la tâche spatiale devrait être détériorée par leur résolution simultanée. Grâce à la réutilisation du paradigme expérimental de Farrell et Robertson (1998), il est possible de soumettre un sujet sain à une tâche spatiale impliquant une mise à jour égocentrée (i.e., pointage après une rotation les yeux fermés selon le point de vue d'arrivée) et de l'associer à une remémoration épisodique. Dans l'expérience de Cerles et collaborateurs (2015), les participants étaient donc soumis à une situation de double tâche. Ils devaient, pendant une rotation passive (i.e., l'expérimentateur tourne la chaise) les yeux fermés effectuer un rappel de source puis, lorsque le déplacement s'arrêtait, pointer vers deux objets appartenant à un pattern préalablement appris. L'effet d'interférence supposé entre les deux tâches nécessitant le processus de mise à jour pourrait se mesurer soit sur les performances de pointage (car le processus est mobilisé pour la remémoration) soit sur les performances de remémoration (le processus est mobilisé pour la tâche de pointage) soit sur les performances aux deux tâches (compromis ou changement de stratégie de résolution). Il est donc possible de prédire une diminution des performances à la tâche de pointage en condition mise à jour. En effet, si la mise à jour est nécessaire à la remémoration épisodique, elle ne devrait pas être disponible pendant le mouvement pour mettre à jour l'orientation de l'individu dans l'espace. Ainsi, les pointages qui ne nécessitent pas la mise à jour du point de vue (i.e., pointer comme si aucun déplacement n'avait été effectué, condition ignorée de Farrell et Robertson, 1998) devraient être moins impactés par la présence de la tâche épisodique que les pointages nécessitant cette mise à jour égocentrée (i.e., pointer les objets en tenant compte du déplacement, condition mise à jour de Farrell et Robertson, 1998). Il est intéressant de souligner que l'interférence (i.e., diminution de performance) est attendue lors de la réalisation de la tâche de pointage la plus facile. En effet, les résultats de Farrell et Robertson (1998) démontrent une plus grande rapidité et une plus grande précision des pointages en condition de mise à jour égocentrée par rapport à la condition ignorée. Le partage de processus entre la remémoration épisodique et la tâche spatiale de pointage pourrait également se mesurer sur les performances à la tâche de rappel de source. En effet, si la mise à jour égocentrée est recrutée par la tâche spatiale, il est possible que le rappel soit plus difficile et moins performant que dans une situation pour laquelle la mise à jour égocentrée n'est pas nécessaire pour la tâche spatiale. Les performances en rappel de source devraient donc être meilleures en condition ignorée par rapport à la condition mise à jour. Les résultats montrent que les temps de réponse à la tâche mnésiques sont plus longs lorsqu'elle est effectuée en parallèle de la condition mise à jour que lorsqu'elle est effectuée en parallèle de la

condition ignorée. Les analyses effectuées sur les erreurs de pointage en degrés indiquent une dégradation de la précision des pointages lors de l'ajout du rappel de source pour la condition mise à jour ; dégradation qui ne s'observe pas en condition ignorée. Ainsi, la réalisation simultanée d'une tâche spatiale de mise à jour égocentrée et une tâche de remémoration épisodique semble générer une interférence. Cette interférence est spécifique à la mémoire épisodique car elle n'est pas mise en évidence lorsque la tâche mnésique réalisée en parallèle est de nature sémantique. Le processus de mise à jour égocentrée semble donc impliqué dans la remémoration épisodique et non pas dans le rappel de connaissances générales et indépendantes d'un contexte spatial particulier.

Dans l'expérience de Gomez et collaborateur (2009), la nature du contenu à rappeler n'était pas de nature spatiale (i.e., rappel libre ou reconnaissance de mots appris). De la même manière, dans l'expérience de Cerles et collaborateurs (2015), il s'agit d'un rappel de source qui consiste à rappeler dans quelle liste, parmi trois, a été appris un mot. Ainsi, ces résultats vont dans le sens d'un processus spatial en mémoire épisodique qui aurait lieu lors de l'apprentissage et lors de la remémoration, indépendamment de la nature du contenu. La mise à jour égocentrée pourrait donc être le processus de transformation de l'information spatiale allocentrée en point de vue égocentrée (et inversement). Ce processus de mise à jour semble même être à l'œuvre lorsque le contenu à rappeler n'est pas le contexte spatial. L'idée que la recréation du contexte est primordiale lors de la remémoration épisodique est de nouveau mise en avant. Gomez et collaborateurs (2012) proposent même que la facilité avec laquelle ce processus spatial de mise à jour du contexte d'apprentissage est réalisé (i.e., fluence) soit impliquée dans la sensation de revivre l'événement associé à la remémoration épisodique. Cette notion de fluence s'inscrit dans les conceptions reconstructives de la mémoire que nous aborderons par la suite. Nous reviendrons ensuite sur la notion de fluence, et comment elle peut être utile dans la conceptualisation de la remémoration épisodique.

D) La théorie de la simulation : développer l'aspect constructif de la remémoration

Dans le modèle BBB un aspect de (re)création est déjà présent lors de la remémoration épisodique pour la composante spatiale de l'épisode. En effet, ce n'est pas l'information stockée qui est disponible lors du rappel, mais le produit du traitement effectué sur le contenu stocké. L'hypothèse d'un traitement lors du rappel prend de l'ampleur et vient alors remplacer l'hypothèse d'une réactivation passive d'un contenu stocké dans le passé. Ce raisonnement a

pour conséquence de donner une plus grande place à la situation dans laquelle se déroule la remémoration par rapport aux modèles précédents. Tulving, Voi, Routh et Loftus (1983) parlaient déjà de *synergistic ecphory*, qui suppose que la remémoration est l'interaction entre la trace mnésique (interne) et la situation dans laquelle se déroule le rappel (indices externes).

Dans la théorie de la simulation épisodique constructive, comme dans la théorie multi-traces, le souvenir est envisagé comme une somme de composantes de différentes natures, qui seraient stockées de manière distribuée dans différentes zones du cortex cérébral. Cependant, la théorie de la simulation épisodique suppose que la remémoration est plus qu'une simple réactivation, c'est une recombinaison. Cette remémoration épisodique n'est donc plus seulement pensée comme une lecture passive, et à l'identique, d'un contenu stocké. Cette conceptualisation se rapproche donc des positions soutenant une nature constructive de la mémoire (Schacter, Norman et Koutstaal (1998). La remémoration est comparée à une tâche de complétion de pattern dans laquelle les éléments du même événement doivent être réactivés ensemble pour que la remémoration épisodique puisse avoir lieu.

L'hypothèse de la simulation épisodique Schacter et Addis, (2007a) supposent que les composants d'un épisode sont stockés de manière distribuée dans le cortex et que lors de la remémoration, un processus va extraire et recombinaison ces éléments de manière flexible afin de reconstruire l'événement expérimenté dans le passé. Addis et Schacter (2008) supposent également que ce processus est utilisé pour créer des événements futurs possibles à partir de détails d'événements déjà vécus. Les composants du souvenir sont donc stockés, mais leur attribution à tel ou tel épisode s'effectue lors de la remémoration. Leur réactivation n'est donc pas passive.

Les auteurs soulignent que cette conceptualisation de la mémoire épisodique permet de rendre compte des erreurs lors du rappel. Les fausses reconnaissances, les intrusions d'éléments n'appartenant pas à l'épisode, ou les confabulations, c'est-à-dire la description précise d'événements n'ayant jamais eu lieu, seraient globalement expliquées par des erreurs de recombinaison des éléments (qui eux sont stockés). L'encodage peut alors avoir lieu tout à fait normalement sans que la remémoration épisodique, et donc le rappel conscient et contrôlé de l'épisode, soit possible. Cette explication est compatible avec les observations cliniques chez les patients amnésiques qui ne peuvent pas faire le récit détaillé d'un épisode, mais dont le comportement peut être modifié à la suite d'un événement qu'ils ont vécu sans pour autant pouvoir attribuer cette réaction à leur expérience passée personnelle. Par exemple, Cermak, Verfaellie, Sweeney et Jacoby (1992) démontrent que le matériel expérimental est encodé par les patients amnésiques, mais qu'ils ne peuvent pas consciemment se le remémorer. En effet,

suite à la présentation d'une liste de mots, les participants ont pour consignes de compléter des phrases à trou, mais sans utiliser les mots présentés précédemment. Les patients amnésiques comparativement aux participants se servent plus de mots appris pour compléter les phrases ce qui tend à montrer que l'apprentissage a bien eu lieu. De plus, que la consigne indique de ne pas se servir du matériel appris ou qu'elle ne mentionne rien, les patients ne modifient pas leur inclusion des mots appris contrairement aux participants contrôles. Ces résultats vont à l'encontre de l'idée que l'encodage est impossible lors d'une lésion hippocampique, mais suggèrent plutôt que c'est le processus de remémoration épisodique qui est déficitaire (pour une opposition de l'hypothèse d'un déficit de l'encodage et de l'hypothèse d'un déficit de la remémoration voir Van Damme et d'Ydewalle, 2009). Schacter et Addis (2007b) supposent que le caractère constructif, bien qu'engendrant des erreurs, est adaptatif.

Chez le sujet sain, des données en faveur d'un processus de recombinaison d'éléments sont présentées par Devitt, Monk-Fromont, Schacter et Addis (2016). Les auteurs démontrent que lorsque des composants d'épisode sont recombinaison de manière fortement ressemblante à des événements s'étant réellement produits, ces recombinaisons peuvent mener à de fausses reconnaissances. Ces résultats ne soutiennent donc pas l'hypothèse que tous les composants sont reliés entre eux de manière immuable dans un réseau créé à l'apprentissage et que la présentation d'un seul composant active tous les autres par diffusion passive d'activation. En effet, dans ce cas, la différence pourrait être faite entre deux épisodes semblables car ils n'activeraient pas la même trace. Ainsi, l'épisode nouveau est reconnu par erreur comme s'étant réellement produit lorsqu'il est rendu fortement ressemblant à un événement vécu grâce à la recombinaison flexible de composants d'événements stockés en mémoire. De la même manière, concernant la flexibilité de la recombinaison, Carpenter et Schacter (2016) démontrent qu'elle pourrait être à l'origine des erreurs dans la spécification de l'épisode dans lequel est apparu un détail. Si les détails étaient liés entre eux lors de l'encodage et que le rappel ne consistait qu'en une réactivation passive, ce type d'erreurs ne pourrait pas être expliqué. En revanche, les modèles dans lesquels une part de reconstruction est supposée lors de la remémoration permettent de rendre compte de ces résultats.

Cette possibilité de recombinaison librement des concepts ou des morceaux d'expériences, de sensations, permet également d'expliquer l'implication d'un réseau similaire pour des tâches de remémoration et des tâches de projection dans le futur (Schacter et Addis, 2007). Au niveau comportemental chez le sujet sain, Madore et Shacter (2016) utilisent un paradigme de *episodic specificity induction* pour mettre à jour la similarité entre remémoration épisodique et projection dans le futur. Dans ce paradigme expérimental, le sujet a pour consigne de générer le plus de

détails possible sur un matériel qui lui a été présenté, par exemple une vidéo. Le participant est encouragé à former des images mentales et à décrire le plus précisément possible, les objets présents et leurs positions, les personnes présentes et leur physique, la nature des actions et comment elles sont réalisées. Cet exercice devrait donc améliorer les performances à toutes les tâches nécessitant le même processus de génération de détails épisodiques. Les résultats montrent que l'induction a un effet sur la remémoration et sur la projection dans le futur, mais pas sur une tâche de description d'images. Ce processus ne semble donc pas uniquement lié à la présence perceptive de détails, mais bien à leur combinaison ou recombinaison de manière flexible. De plus, Schacter, Benoit et Szpunar (2017) soulignent qu'un réseau cérébral est commun aux tâches de projection dans le futur et de remémoration, mais mettent également en avant l'impact de la pensée tournée vers le futur dans d'autres tâches de type navigation, le sens du soi, la mémoire prospective, etc.

E) La théorie de la construction de scènes : la remémoration basée sur un processus spatial constructif commun à de nombreuses tâches

Il est important de noter que dans la théorie de la simulation, la notion de spatial a repris une place de contenu uniquement. En effet, le processus de recombinaison à l'œuvre dans la remémoration, bien qu'il soit constructif, n'est pas supposé de nature spatiale. Dans la théorie de la construction de scènes, la notion de *spatial* va retrouver à la fois son rôle de contenu de l'épisode, mais également de processus nécessaire à la remémoration. Le modèle BBB proposait déjà ce double rôle du spatial, cependant le processus spatial de transformation est supposé agir seulement sur un contenu spatial. Au contraire dans la théorie de la construction de scènes, le processus de construction, supposé de nature spatiale, serait également impliqué dans la remémoration du contenu non spatial de l'épisode.

Dans cette théorie l'hippocampe n'est plus pensé de nature mnésique ou spatiale mais plutôt comme impliqué dans un processus qui doit être réalisé pour réussir plusieurs tâches différentes. En effet, un réseau similaire est activé lors de la remémoration épisodique, de la projection dans le futur, de tâches nécessitant un changement de perspective, de la navigation ... (pour une revue de la littérature voir Hassabis et Maguire, 2007). Le processus de construction supposé ici est donc à la fois de nature différente à celui supposé dans la théorie de la simulation épisodique, mais serait également impliqué dans une plus grande variété de tâches cognitives.

La théorie de la construction de scènes propose alors que toutes ces tâches soient sous-tendues par un processus de génération et de maintien de scènes complexes et cohérentes. Une scène est définie comme une représentation naturelle et en trois dimensions du monde, spatialement cohérente, dans laquelle se situe généralement des objets et qui est perçue à partir d'une perspective égocentrée (De Luca, McCormick, Ciaramelli et Maguire, 2019). La notion de *spatial* est donc centrale dans cette théorie qui propose que le lieu dans lequel s'est déroulé l'événement remémoré serve de charpente à la construction du souvenir. Le contexte spatial est une base pour intégrer les éléments constitutifs du souvenir (e.g., personnes présentes, émotions, sons, odeurs...). Ainsi, un processus spatial serait donc à l'origine de l'intégration de détails de nature non spatiale. De plus, contrairement aux théories précédentes, cette représentation de la scène, de l'événement, n'est pas stockée mais construite au moment de la réalisation de la tâche.

Dans le cadre de la théorie de la construction de scènes, si l'hippocampe n'est plus considéré comme une structure centrale pour la remémoration, mais comme nécessaire pour la construction de scènes spatialement cohérentes, la nature mnésique de la tâche ne devrait donc pas guider l'activation du réseau. Dans ce sens, Zeidman, Mullally et Maguire (2015) mettent à jour une activation du même réseau que la tâche nécessite la construction ou la perception d'une scène. Palombo, Hayes, Peterson, Keane, Verfaellie (2016) manipulent la demande en termes de construction de scènes et démontrent son lien avec le degré d'activation du réseau, alors qu'aucune différence n'est rapportée lors de la modification de la temporalité (présent versus futur). Ensemble, ces résultats tendent à montrer que la notion de construction de scènes est plus discriminante quant à l'activité du réseau que la notion de mémoire ou de temporalité.

De la même manière, grâce à une étude avec des patients amnésiques Hassabis, Kumaran, Vann et Maguire (2007) montrent que le caractère passé n'est pas indispensable à l'implication du processus de construction de scènes et que lors d'une lésion hippocampique, des déficits liés à la construction de scènes atemporelles mais spatialement cohérentes peuvent être mesurés. Sur la base d'un indice verbal les participants contrôles et les patients amnésiques devaient imaginer un nouvel événement (e.g., imaginez-vous allongé sur le sable blanc d'une magnifique plage tropicale). Les résultats indiquent que les patients amnésiques ont une description plus pauvre de la scène imaginée en comparaison aux participants contrôles. Cela se caractérise par moins de détails spatiaux, moins de descriptions sensorielles et émotionnelles de la scène ainsi qu'une moindre cohérence spatiale. Les auteurs interprètent ce dernier point comme le reflet du caractère fragmenté de la scène (suite d'images indépendantes) et donc

d'une incapacité des patients à percevoir la scène imaginée comme un tout. Cette interprétation est cohérente avec le retour d'expérience des patients suite à une tâche de construction de scènes qui mettent l'accent sur la difficulté liée à cette cohérence spatiale : « c'est comme écouter la radio au lieu de regarder la télévision, j'imagine des choses mais aucune scène visuelle ne s'ouvre devant moi » (Maguire et Mullally, 2013).

Cette preuve en faveur d'un rôle de la construction de scène, pour expliquer les déficits des patients amnésiques (et donc la potentielle implication de ce processus en mémoire épisodique), est cependant limitée par l'aspect non objectif des mesures, dans le sens où les variables de difficultés et d'unité spatiale de la scène sont autoreportées. Les auteurs s'accordent sur l'impossibilité d'exclure totalement la possibilité que les associations sémantiques soient moins performantes chez les patients amnésiques comparativement aux participants contrôles. En effet, les souvenirs vécus sont tout de même une base de données de relations entre objets intéressante pour la création d'une scène imaginée. Autrement dit, un déficit d'une autre nature pourrait être avancé comme hypothèse pour expliquer les résultats en imagination de scènes chez les patients amnésiques.

En se basant sur le biais d'extension de frontière connu chez le sujet sain lorsqu'il mémorise une scène (et ce quel que soit son âge, Seamon, Schlegel, Hiester, Landau et Blumenthal, 2002), il est possible d'argumenter dans le sens d'une perturbation du processus de construction de scènes chez les patients amnésiques qui ne peut pas être exclusivement expliqué par un déficit que ce soit de l'encodage ou de l'impossibilité d'accéder à des souvenirs. L'extension de frontières est un phénomène qui consiste en une représentation mentale de la scène plus large que la scène qui a été perçue (pour une revue des effets d'extension de frontières voir Hubbard, Hutchison et Courtney, 2010). C'est un peu comme si l'observateur avait fait un pas en arrière entre la première présentation et le rappel (voir Figure 1). En ce qui concerne les sujets sains, ces données expérimentales ne prônent pas en faveur d'un stockage de la perception puis de sa réactivation à l'identique lors de la remémoration. De plus, ce phénomène apparaissant très tôt après la disparition perceptive de la scène (Intraub, Bender et Mangels, 1992), il est très facile de soumettre des patients amnésiques à ce type de tâche.

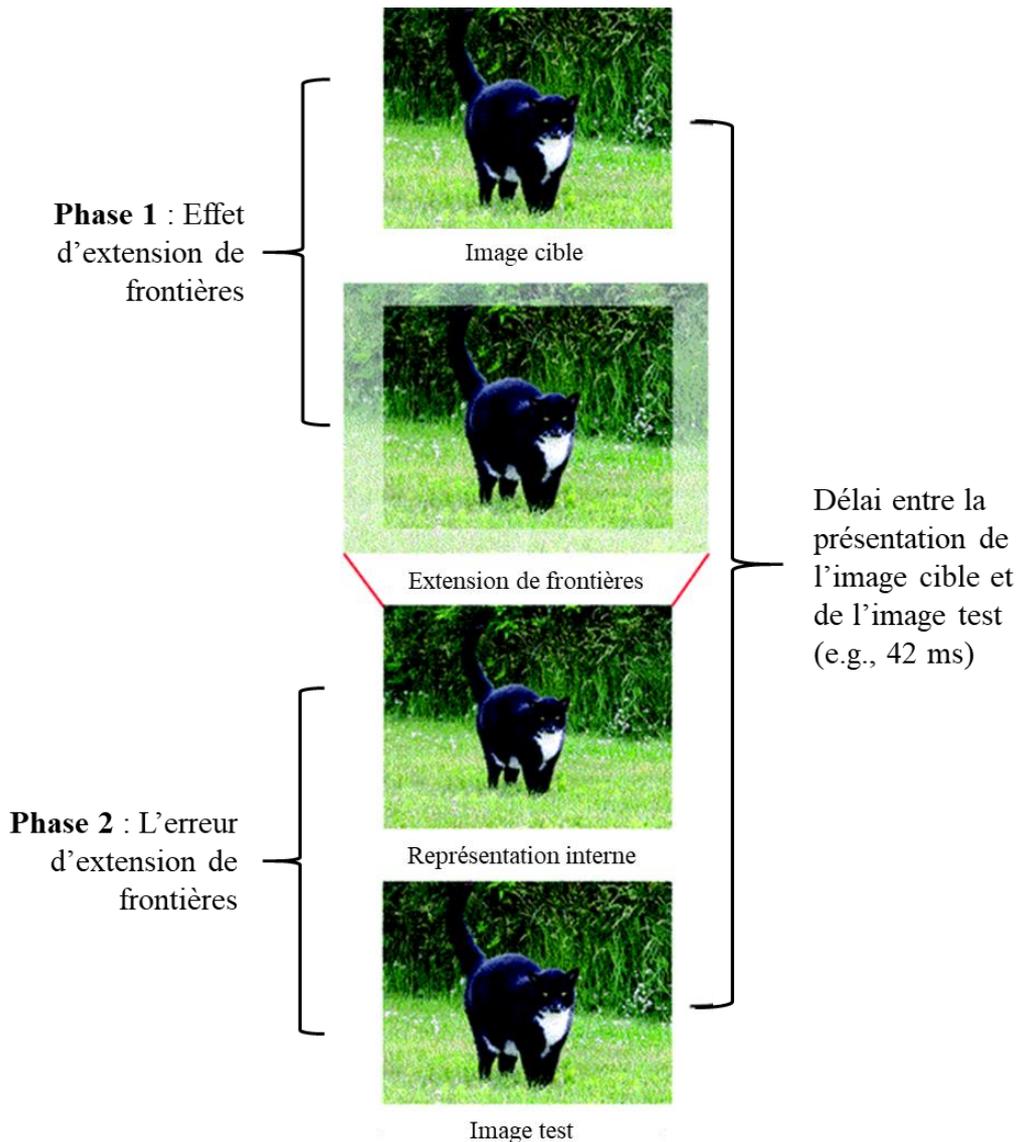


Figure 1: Déroulement du phénomène d'extension de frontière. Traduite de Maguire, E. A., & Mullally, S. L. (2013). *The hippocampus: a manifesto for change*. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1180. Disponible à l'adresse <https://psycnet.apa.org/fulltext/2013-25332-001.html>

Cette figure illustre le phénomène d'extension de frontières. Lorsque l'individu perçoit une scène (image cible), dès que l'image disparaît il extrapole au-delà des limites visibles de la scène pour former sa représentation (extension de frontières). Ensuite, lorsque la même image lui est représentée en test, elle est comparée à la représentation mentale qui est plus large que la véritable image cible, ce qui mène à une erreur d'extension de frontières (Phase 2). Ainsi, l'image test est qualifiée comme étant vue de plus près par rapport à l'image cible alors qu'il s'agit en fait de la même image.

Dans le cadre de la théorie de la construction de scènes, l'hypothèse est que les patients amnésiques ont des difficultés à construire des scènes mentales de par l'implication de l'hippocampe dans ce processus. Ainsi, il est possible que ces patients ne soient pas soumis à ce biais d'extension de frontières inhérent à la perception d'une scène. Une plus grande précision lors du rappel des frontières d'une scène devrait donc être observée chez les patients

amnésiques par rapport aux participants contrôles. Cette absence d'effet d'extension de frontières se caractériserait alors par une mémoire de la scène plus exacte pour les patients amnésiques que pour les participants contrôles. Ces hypothèses sont congruentes avec les résultats rapportés par Mullally, Intraub et Maguire (2012). Dans un paradigme de présentation visuelle sérielle rapide, la scène (i.e., un objet sur un fond, par exemple un seau jaune posé sur un sol en gravier) est présentée visuellement. Cette présentation est suivie d'un masque puis la même image est présentée de nouveau. La tâche du participant est de statuer sur la différence de prise de vue entre la deuxième et la première image. Autrement dit, le participant doit déterminer si l'image est prise de plus près (i.e., il y a moins de fond et l'objet central apparaît plus gros), si elle est prise de plus loin (i.e., il y a plus de fond et l'objet central apparaît plus petit) ou si elle a été prise à la même distance (i.e., l'image présentée en deuxième est identique à celle présentée en premier). Dans cette expérience, les deux images étant toujours identiques, la bonne réponse à tous les essais était donc : les deux images ont été prises de la même distance. Cependant, si le participant est sensible à l'effet d'extension des frontières, la représentation interne de la scène est une vue plus éloignée que l'image réellement présentée. Ainsi, lorsque le participant comparera sa représentation mentale de la première image à la seconde image sous ses yeux, cette dernière devrait lui apparaître comme prise de plus près. Les résultats montrent que c'est ce qui se produit pour les participants contrôles. En effet, ils répondent plus souvent que la seconde image est prise de plus près que la première. Au contraire, les patients amnésiques répondent plus souvent que les deux images étaient identiques. Paradoxalement, leur mémoire de la scène est donc plus précise que celle des participants contrôles ce qui peut argumenter dans le sens d'un déficit du processus de construction de scènes (qui, lorsqu'il est à l'œuvre est soumis à ce biais d'extension de frontières). Le degré de certitude associée aux réponses renforce ce pattern de résultats. En effet, les patients amnésiques ont une confiance plus élevée en leur réponse *identiques* qu'en leur réponse *plus proche* alors que c'est l'inverse pour les participants contrôles. Ces résultats sont répliqués avec une tâche de dessin de scènes de mémoire et avec un rappel des frontières d'une scène suite à son exploration tactile.

Maguire et Mullally (2013) soulignent l'amalgame qui a pu être fait entre l'hippocampe et la mémoire épisodique en soutenant que leur théorie ne s'inscrit pas dans ce total recouvrement peu compatible avec les données d'imagerie cérébrale (voir aussi Hassabis et Maguire, 2009). En effet, les auteurs insistent sur le fait que l'hippocampe est probablement impliqué dans d'autres fonctions cognitives et que, si la mémoire épisodique implique la structure hippocampique elle fait également appel à d'autres structures cérébrales et processus cognitifs. Cependant, très peu d'études comportementales chez le sujet sain ont été menées afin de tester

cette hypothèse d'implication du processus de construction de scènes dans la réalisation de tâches cognitives comme la remémoration, la projection dans le futur, l'imagination... Clark, Hotchin, Monk, Pizzamiglio, Liefgreen et Maguire (2019) analysent donc les résultats comportementaux de sujets sains à des tests cognitifs variés impliquant, d'après les résultats en IRMf disponibles actuellement, une activation hippocampique lors de leur résolution. Dans cette étude les participants effectuent des tâches évaluant la construction de scènes, la mémoire épisodique, la projection dans le futur et la navigation spatiale (ces tâches ont été choisies grâce à l'implication d'un réseau cérébral particulier lors de leur résolution). Les données comportementales issues de la réalisation de ces tâches par des participants sains ont été analysées. Le premier but de ces analyses est de mettre à jour, si possible, une relation entre toutes ces tâches, plus forte qu'avec d'autres tâches qui n'impliquent pas ce même réseau cérébral (e.g., fluence verbale, empan de chiffres, matrices...). L'analyse en composantes principales fait ressortir un facteur *scènes* qui regroupe les tâches de construction de scènes, de projection dans le futur et de mémoire autobiographique, seule la tâche de navigation n'est pas incluse dans ce facteur. La seconde hypothèse pouvant être testée grâce à ces données comportementales est celle supposant que le lien entre les tâches d'intérêt peut être expliqué par le recrutement d'un processus de construction de scènes. Ainsi, les auteurs, grâce à des analyses de médiations, mettent en évidence que la tâche de construction de scènes est à la fois corrélée à la projection dans le futur, à la navigation et à la mémoire autobiographique et peut expliquer une part significative du lien entre ces variables prises deux à deux. Cependant, la mémoire autobiographique ne semble pas être un bon médiateur car elle ne corrèle pas, dans ce cas, avec la navigation et la projection dans le futur. Ces résultats renforcent l'intérêt de l'hypothèse de la construction de scènes comme base de la conceptualisation de la mémoire épisodique.

III- Les conséquences de la notion de construction sur l'appréhension de la cognition

Au-delà des deux modèles présentés précédemment, celui de la simulation épisodique et celui de la construction de scène, la notion de mémoire constructive est en fait assez ancienne. Bartlett s'intéresse au départ à l'évolution de représentations artistiques culturelles transmises au fil des générations (pour une discussion autour des mentors de Bartlett, l'origine de sa pensée et son évolution voir Wagoner, 2017). Puis, plus tard, Bartlett (1932) démontre que lorsque le matériel présenté (e.g., un texte) provient d'une culture différente de celle du participant, des

transformations sont effectuées lors du rappel. Dans son exemple, le texte écrit par des Amérindiens évoquant un fantôme subit des rationalisations lors du rappel de la part de ses participants britanniques. Les modifications observées (i.e., distorsions), tant dans la transmission entre individus que dans le rappel individuel, sont interprétées comme une preuve de la reconstruction du contenu (en opposition à une reproduction à l'identique). Wagoner (2017) propose une lecture des travaux de Bartlett et des chercheurs s'inscrivant à sa suite dans un mouvement constructiviste de la théorisation de la mémoire au niveau social et individuel. Il souligne que cette vision anthropologiste de la mémoire constructive a ouvert les portes à la conceptualisation d'une mémoire constructive dans une approche au niveau individuelle (objet d'étude de la psychologie et non plus de l'anthropologie). L'intérêt de l'approche de Bartlett est qu'elle considère la remémoration comme intégrée dans un contexte social et sociétal. Ainsi, il ne considère pas que les distorsions soient des erreurs dans le sens négatif du terme, mais plutôt qu'elles sont une preuve de flexibilité dans un monde en perpétuelle évolution. La mémoire n'est alors plus pensée comme une fonction cognitive indépendante des autres mais permet de faire des liens entre des expériences de nature différentes et même d'augmenter la diversité des réponses comportementales à disposition de l'individu. Elle est donc adaptative et orientée vers l'utilité future de l'expérience passée. Cette inscription historique des théories de la simulation épisodique et de la construction de scènes les conduit à hériter des caractéristiques mises en avant par Bartlett, c'est-à-dire une certaine flexibilité de la mémoire, intégrée dans un système perceptivo-moteur et social ce qui oriente la réflexion vers la question de son utilité fonctionnelle plutôt que vers son exactitude. Bien que ces deux théories s'inscrivent dans un cadre commun, celui des théories reconstructives, il convient de délimiter et d'examiner leurs divergences au regard des données expérimentales actuellement disponibles. Au-delà de ces différences elles présentent aussi un challenge commun : rendre compte du singularisme d'un épisode lié à la définition même de la remémoration épisodique, comme le rappel d'un moment précis de l'espace et du temps.

A) Simulation épisodique constructive ou construction de scènes : Quelle(s) différence(s) ?

La difficulté d'opposition des modèles au niveau expérimental repose en partie sur le fait que, s'ils supposent des processus différents pour sous-tendre la capacité de remémoration, leurs prédictions peuvent être identiques. Par exemple, l'implication hippocampique dans la perception de scènes naturelle (Zeidman et collaborateurs, 2015) est prédite par la théorie de la

construction de scènes mais également par la théorie multi-traces (et donc par la théorie de simulation épisodique qui est sous-tendue par la même hypothèse d'implication du processus relationnel). L'interprétation de ce résultat diffère cependant d'une théorie à l'autre. L'hippocampe, qui aurait un rôle de lien selon la théorie multi-traces, serait une structure recrutée pour toutes les tâches nécessitant de faire le lien entre divers éléments, disparates en termes de nature et/ou de structures impliquées dans leur traitement (Yonelinas (2013) propose une revue des données en faveur de cette hypothèse). L'hippocampe est activé lorsque la complexité du matériel présenté expérimentalement est importante. La construction de scènes quant à elle suppose que l'activation hippocampique lors de perception de scènes naturelles complexes est due à la nature scénique de la stimulation (pour une étude du réseau impliqué dans le traitement des stimuli scènes en comparaison à des stimuli objets voir Hodgetts, Shine, Lawrence, Downing et Graham, 2016). De plus, McCormick, Dalton, Zeidman et Maguire (2021) manipulent en parallèle l'aspect scénique de la stimulation et sa complexité. Les résultats montrent que l'hippocampe est davantage activé lors de la présentation d'une scène comparativement à cette même scène présentée avec les pixels mélangés aléatoirement. Son activation ne semble cependant pas être influencée par la complexité du stimulus. Dalton, Zeidman, Mc Cormick et Maguire (2018) opposent une tâche regroupant de nombreuses caractéristiques d'une construction de scènes (e.g., aspect en trois dimensions, présence de plusieurs objets) à une tâche de complexité équivalente qui impliquerait un processus d'association (processus relationnel supposé dans la théorie multi-traces et celle de simulation épisodique). Bien qu'une activité différente soit mesurée lors de la réalisation de ces deux tâches, l'hippocampe est toujours impliqué. Ces résultats démontrent qu'il est impossible d'exclure, sur la seule base des données en imagerie, l'une ou l'autre des théories. Ekstrom et Ranganath (2017) soulignent cependant qu'au départ, la notion de scènes n'était pas clairement définie, rendant difficile la mise à l'épreuve expérimentale de la théorie de la construction de scène. De Luca, McCormick, Ciaramelli et Maguire (2019) ont pallié à cette absence en définissant la notion de scène comme la pierre angulaire de trois notions : la cohérence spatiale, la perspective égocentrée et la présence d'éléments de différentes natures.

La place de l'imagination

Les deux modèles s'accordent sur le partage d'un processus entre la projection dans le futur et la remémoration épisodique, et prédisent donc que cette projection dans le futur serait affectée au même titre que la remémoration épisodique lors d'une amnésie. Cependant, les deux modèles ne font pas les mêmes prédictions concernant l'imagination. En effet, la théorie de la

simulation associe très souvent imagination avec le caractère futur de l'événement, ce que ne fait pas la théorie de la construction. Les notions de soi et de temps sont en effet toutes deux présentes dans la remémoration et dans la projection dans le futur. Cependant, un événement imaginé peut être atemporel (e.g., l'action se situe dans un monde imaginaire) et apersonnel (i.e., aucun des personnages qui compose l'événement n'est l'individu qui imagine).

L'importance de la notion de soi pour impliquer le processus de simulation épisodique est soutenu par des résultats montrant une dissociation chez les patients amnésiques entre une tâche de projection dans le futur pour des événements généraux (e.g., Pouvez-vous me dire quels seront, selon vous, les problématiques auxquelles devra faire face l'écologie dans les 10 prochaines années ?) et des événements autobiographiques qui pourraient se produire (e.g., Qu'allez-vous faire à Noël prochain ? ; Klein, Loftus et Kihlstrom, 2002). Ainsi, la théorie de la simulation propose que l'imagination d'événements n'implique pas uniquement le même processus que celui de la remémoration. Ce serait à la fois une création de nouvelles relations et le recrutement de relations déjà utilisées et elle demanderait donc moins de ressources au processus relationnel (Schacter et Addis, 2020). Cette conceptualisation de l'imagination pourrait expliquer le recouvrement seulement partiel du réseau impliqué dans l'imagination et la remémoration (e.g., Addis, Wong et Schacter, 2007 ; Addis, Pan, Vu, Laiser et Schacter, 2009).

Au contraire, pour la théorie de la construction de scènes, l'imagination est une tâche qui impliquerait le même processus de construction que la remémoration et la projection dans le futur. Hassabis et Maguire (2009) proposent que comme le réseau activé pendant la remémoration soit également impliquée dans de tâches atemporelles. Le temps ne serait donc pas la clef pour comprendre le processus impliqué dans la remémoration. Hassabis et collaborateurs (2007) ont notamment démontré un déficit de l'imagination de scènes atemporelles chez les patients amnésiques. Dans leur théorie, la cohérence spatiale de la scène est centrale dans les prédictions comportementales. Cependant, Kim, Dede Hopkins et Squire (2015) ne mettent en évidence aucun déficit pour l'imagination d'une scène chez les patients amnésiques par rapport aux contrôles (voir aussi Squire, van der Horst, McDuff, Frascino, Hopkins et Mauldin, 2010). Comme le soulignent Maguire et Hassabis (2011), la variabilité dans ces résultats peut s'expliquer par des différences de localisation des lésions et leur ampleur chez les sujets amnésiques, mais également par des différences dans les caractéristiques d'intérêt analysées. Par exemple, l'index de cohérence spatiale (i.e., caractère fragmenté versus unifié de la scène) a été délaissé dans les deux expériences de l'équipe de Squire. Les études

s'accordent cependant à dire que la sensation de présence dans l'événement imaginé est rapportée plus faible chez les patients amnésiques que chez les sujets sains.

Y a-t-il un lien entre perception et mémoire ?

Dans le cadre de la construction de scènes, il est possible d'envisager des processus communs entre perception et mémoire. Comme nous l'avons vu plus haut avec le phénomène d'extension de frontières, l'interaction du système cognitif avec les scènes est mesurable même très peu de temps après leur présentation (Intraub et Dickinson, 2008). La séparation de la perception et de la mémoire au cours du temps n'est donc pas si aisée. Il semblerait que ces deux capacités cognitives soient également difficilement conceptualisables comme totalement distinctes. L'effet des informations top-down dans la perception est maintenant bien connu. Par exemple, Olkkonen, Hansen, Gegenfurtner (2008) demandent au participant d'ajuster le niveau de gris d'un objet ou d'un cercle afin qu'il soit identique au gris du fond qui l'entoure. L'objet central avait une couleur prototypique, par exemple une banane qui est jaune ou une tomate qui est rouge, mais était présenté en gris. Cependant, savoir qu'une banane est jaune influence l'ajustement du niveau de gris de l'objet. Autrement dit, pour percevoir le gris qui compose la banane aussi gris que le fond, la nuance de gris est ajustée plus bleu, soit la couleur opposée au jaune dans le spectre. Ces résultats sont interprétés comme une influence des connaissances antérieures dans la perception. Le gris est vu plus jaune quand il remplit une banane que quand il remplit une forme géométrique. Il n'y a donc aucune perception pure, aucune perception n'est indépendante du système de traitement, de l'individu qui perçoit et de ses expériences passées. L'environnement auquel est exposé l'individu module le système cognitif, et le système cognitif module les sensations en provenance de l'environnement.

Au contraire du concept de construction, la théorie de la simulation ne suppose aucune similarité entre processus de perception et de description d'une scène et la mémoire d'un événement. Dans une expérience similaire à celle présentée plus haut dans ce chapitre, Madore, Gaesser, and Schacter (2014) démontrent une dissociation chez les jeunes adultes, grâce à l'*episodic specificity induction*, entre le rappel d'événements passés et la projection dans le futur qui bénéficient de cette manipulation, et une tâche de description d'images qui au contraire ne profite pas de l'induction. Ces résultats soutiennent l'hypothèse que la remémoration d'événements autobiographiques et la projection dans le futur sont toutes deux issues de la recombinaison d'éléments stockés. Cependant, lorsque le raisonnement est appliqué au vieillissement normal les résultats sont moins clairs (Gaesser, Sacchetti, Addis, et Schacter, 2011). En effet, lors du vieillissement normal (en opposition à pathologique), la sémantisation

observée dans le rappel d'événement passé pourrait permettre d'évaluer si cette sémantisation touche d'autres tâches. Ainsi, toutes les tâches affectées par la sémantisation pourraient être sous-tendues par le même processus. Ainsi, si la perception de scènes et leur description ne fait pas appel au même processus de simulation épisodique, la qualité des descriptions devrait être préservée, au contraire de la description des souvenirs épisodiques et des projections dans le futur. Cependant, les résultats montrent une diminution des détails épisodiques chez les personnes âgées par rapport aux personnes jeunes, sans effet différentiel de la tâche. Autrement dit, la description d'image entraîne tout autant que les tâches de mémoire autobiographique et de projection dans le futur une diminution des détails de nature épisodique ce qui irait à l'encontre de la théorie de la simulation épisodique. Les auteurs proposent cependant une interprétation alternative de ces résultats. L'absence d'effet différentiel entre les tâches serait la preuve qu'un processus non mnésique est à l'œuvre dans leur résolution, comme par exemple un effet de changement de style narratif chez les personnes âgées. Si ce type de données expérimentales peuvent être interprétées comme remettant en question la théorie de la simulation elles pourraient être expliquées par la nécessité d'un processus de construction d'une scène à la fois dans la perception de scène et la remémoration épisodique. Autrement dit, s'il s'agit d'une scène, alors le processus est impliqué dans la tâche, qu'elle soit mnésique, perceptive ou prospective.

Roberts, Schacter et Addis (2018) défendent l'idée que le processus de construction de scènes et le processus relationnel (qui sous-tend l'hypothèse de simulation constructive) ne sont pas des concepts aussi distincts que ce qu'il a été supposé jusque-là. Ils soulèvent le problème que des résultats similaires peuvent être interprétés selon les deux cadres théoriques et donc amener à deux conclusions différentes. Par exemple, dans l'expérience menée par Palambo et collaborateurs (2016), la manipulation de la variable indépendante est associée à une faible versus une forte demande en termes de construction de scènes. Une manipulation similaire dans Addis, Cheng, Roberts et Schacter (2011) est cependant associée au caractère spécifique versus général de l'événement. Ainsi, les résultats sont interprétés en termes d'engagement de l'hippocampe dans l'élaboration d'un événement spécifique ou lors d'une forte demande de construction de scènes, mais ces deux interprétations possibles sont en faveur de deux cadres théoriques différents. Roberts et collaborateurs (2018) proposent que le processus relationnel sous-tendant la remémoration puisse également expliquer la construction de scènes, autrement dit, l'hypothèse de simulation constructive peut expliquer l'implication hippocampique dans la construction de scènes mais n'est pas limitée à ce type de tâche. Il est important de noter

cependant que les auteurs ne mettent derrière le processus de construction de scènes que la notion d'éléments spatiaux, comme si le processus de nature spatiale ne pouvait traiter que les composantes spatiales de l'épisode. Ainsi, ils concluent que les épisodes étant composés de détails non scéniques comme des émotions, des personnes, etc., leur intégration nécessite forcément le processus relationnel (indépendant de la nature des composants de l'épisode) pour pouvoir être perçus comme un tout cohérent. De nouveau, il devient alors évident qu'il est difficile, dans l'état actuel de définition de chacune de ces deux théories, de mettre au point un paradigme expérimental pour confronter ces deux modèles.

B) Que devient l'hypothèse du singularisme des épisodes ?

Dans la définition même de la mémoire épisodique, un épisode est une combinaison unique d'éléments (e.g., personnes, émotions...) ayant des coordonnées spatio-temporelles uniques. La vision singulariste définit la mémoire épisodique comme un état mental unique associé à un événement spécifique expérimenté dans le passé (Andonovski, 2020). Cette position singulariste peut être mise au défi notamment par deux arguments. Tout d'abord, Andonovski (2020) regroupe plusieurs preuves expérimentales démontrant que lors d'une tâche de rappel libre très peu d'épisodes sont spécifiques au sens unique du terme. Au contraire, le récit est souvent la somme de plusieurs épisodes de même nature (e.g., *j'ai beaucoup regardé la télévision la semaine dernière* ou *je mange des crêpes au petit-déjeuner*, etc.). Bien que ce type de souvenir ne soit pas considéré comme épisodique, mais plutôt comme des connaissances sémantiques sur soi-même, l'auteur souligne leurs points communs avec des souvenirs épisodiques singuliers. De plus, la transformation au fil du temps des traces mnésiques, leur consolidation et leurs transformations suite à l'expérience d'autres événements similaires, met au défi la supposition de traces mnésiques encodées et stockées indépendamment les unes des autres.

Cette conception de la nécessité d'une trace singulière pour qualifier le souvenir d'épisodique a des conséquences théoriques. Cependant, cet aspect est très peu étudié expérimentalement et cette hypothèse d'un singularisme des épisodes est une question majoritairement adressée par les philosophes. Si la mémoire épisodique est modélisée comme la réactivation d'un réseau ou d'un état cérébral antérieur qui permet la reviviscence d'un événement et d'un état cognitif (e.g., sensations, pensées...) spécifique et unique, alors il est nécessaire que le réseau impliqué dans la remémoration de chaque épisode soit distinct. La singularité de chaque épisode au niveau neuronal permet de souligner que la réactivation d'états

antérieurs se rapproche grandement des théories de stockage bien que d'une manière plus distribuée. En effet, si à chaque épisode est dédié un réseau, un ensemble de neurones qui se réactivent, le problème de la limite du nombre d'états possibles grâce à un nombre fini de neurones se pose de la même manière que dans le cadre du stockage non distribué.

L'existence d'un lien entre la singularité à la fois du contenu d'un épisode (i.e., il est différent de tous les autres épisodes en mémoire) et de l'événement qui mène à l'encodage de cet épisode (i.e., cet événement est unique et a des coordonnées spatio-temporelles qui lui sont propres) avec la sensation d'épisodicité a été étudiée en philosophie. Le relationnalisme propose un lien causal entre l'événement passé unique (i.e., singulier) et la trace mnésique (i.e., souvenir) qui permettrait d'accorder sa nature passée à la trace. Ce lien causal reposerait sur la réactivation, la ressemblance sensorielle directe (i.e., accointance) entre la remémoration et la perception. Perrin (2019), tout en exposant ce raisonnement, soulève deux problèmes au relationnalisme. Le premier est lié à l'encodage neural des événements. En effet, un réseau créé lors d'un épisode peut être renforcé par d'autres événements similaires et ainsi ne pas résulter en une totale dissociation du code neural entre toutes les traces mnésiques. Le second problème concerne le possible caractère sensori-moteur d'un événement imaginé (qui n'a donc pas été vécu). Ainsi, l'accès direct à des propriétés sensorielles, s'il peut être considéré comme une condition sine qua non à la sensation de revivre l'événement passé, la contraposée n'est pas vraie, autrement dit la présence de propriétés sensorielles n'est pas propre à la remémoration épisodique.

Dans une hypothèse de construction, cette question de la singularité ne se pose plus. En effet, il s'agit seulement de savoir si ce que je crée dans le présent est quelque chose que j'ai déjà vécu dans le passé. Les épisodes n'ont plus à être orthogonaux pour être stockés distinctement dans le réseau mnésique. Dans une théorie de construction pure, aucun stockage d'une trace devant contenir l'épisode lui-même n'étant supposé, les événements construits peuvent être aussi ressemblants que possible entre eux. Le challenge repose ensuite sur la précision du processus d'attribution de cette scène à son propre passé, autrement dit sur le degré de similarité nécessaire entre la construction et la re-construction. Plus la similarité nécessaire doit être grande, entre l'événement originalement vécu et la re-construction, pour attribuer cette dernière à une expérience passée, plus le système est fiable. En effet, il y aura très peu de (més)attributions au passé d'un événement imaginé, et également la possibilité de se rappeler distinctement de deux épisodes très semblables (e.g., *je suis allée randonner au lac blanc un samedi où il faisait beau temps avec ma famille* versus *je suis allée randonner au lac blanc un samedi où il faisait beau temps avec mon conjoint*). Par contre, la capacité à extraire une

information comportementalement utile d'une série d'épisodes similaires pourrait être compromise si la différenciation est tellement fine qu'il en devient impossible de percevoir et de tirer parti des ressemblances entre les expériences passées.

C) Imagination, projection dans le futur et remémoration d'épisodes vécus : entre continuisme et discontinuisme

Les preuves présentées jusque-là en faveur d'un partage de processus entre la remémoration et d'autres tâches cognitives (i.e., projection dans le futur, imagination d'événements atemporels, etc.) soulèvent la question de la différence qu'il existe entre l'imagination et la remémoration. Michaelian, Perrin et Sant'Anna (2020) soulignent qu'historiquement cette différenciation a été considérée comme acquise, mais que les résultats récents dans le domaine de la psychologie amènent à ré-évaluer cette assertion. En effet, le partage d'un même processus pour la résolution de plusieurs tâches questionne les critères d'attribution de la production de ce réseau à la mémoire ou à l'imagination. Gomez et collaborateurs (2012) anticipaient déjà ce questionnement en proposant une réflexion autour de la fluence, notion sur laquelle nous reviendrons dans la partie qui suit. Ainsi, deux courants de pensée voient le jour. D'un côté, les *discontinuistes* qui supposent que bien que les tâches soient réalisées par le même réseau et peuvent impliquer des processus similaires, il existe une différence fondamentale entre mémoire et imagination : le lien causal qu'entretient le rappel avec un événement (vécu) du passé. Au contraire, les *continuistes*, eux, supposent que les différentes tâches sont réalisées par le même processus cognitif, et la remémoration est donc considérée comme une imagination fiable du passé.

Comme présenté par Gérardin-Laverge (2017), le voyage mental dans le passé et dans le futur pourrait se différencier qualitativement, argument avancé en faveur du discontinuisme. En effet, se projeter dans le futur ne signifie pas que l'événement aura lieu alors que lors de la remémoration, il est possible d'être sûr que cet événement a bien eu lieu. Il y aurait donc une différence au niveau de l'exactitude, de la fiabilité dans le produit du processus. Cependant, l'exactitude des souvenirs n'est pas toujours vérifiée. Les théories pionnières de la mémoire épisodique supposent que les souvenirs sont fiables mais des preuves expérimentales (e.g., faux souvenirs chez les sujets sains) et empiriques (e.g., différence dans le rappel d'un même événement entre deux personnes) mettent à l'épreuve cette considération d'une fiabilité sans faille de la mémoire. La remise en question de l'exactitude du souvenir devient encore plus évidente avec la prise en compte d'une notion de construction lors de la remémoration.

Que l'une ou l'autre position théorique soit défendue, il devient nécessaire de s'interroger sur le processus qui permet de différencier un souvenir d'un événement imaginé, puisque dans les deux cas un partage de processus (plus ou moins important) est supposé. Bien que la question du lien épistémique entre imagination et mémoire relève plutôt du champ de la philosophie et ne peut être directement étudiée expérimentalement, la psychologie peut émettre des hypothèses opérationnalisables sur la nature du processus à l'œuvre dans l'attribution d'une remémoration au passé ; en essayant par exemple de mettre au point des paradigmes générant de fausses attributions d'un événement nouveau au passé. Ainsi, après ce bref détour par des conceptions philosophiques de l'épisodicité, la section suivante s'intéressera aux processus cognitifs supposés à l'œuvre dans la différenciation de l'imagination et de la mémoire.

D) Comment distinguer un événement vécu de l'imagination et de la projection dans le futur ? L'hypothèse d'une propriété mnésique du processus : le concept de fluence

Lorsque la théorie suppose un stockage des épisodes en mémoire, la question de la différence entre un épisode vécu ou imaginé ne se pose pas, car la réactivation d'un réseau construit lors de l'apprentissage est la preuve ultime de la trace d'un encodage antérieur et donc du caractère vécu de l'événement remémoré. Par contre, dès qu'une notion de construction est supposée lors de la remémoration et que le recours à une trace physique diminue, la question de la différenciation entre remémoration et imagination/projection se pose. Autrement dit, plus la théorie tend vers une conception continuiste entre imagination et mémoire plus il devient nécessaire de spécifier comment la différence peut être faite entre deux productions issues de ce même processus.

Il est tout d'abord possible de supposer que le caractère passé est stocké avec les éléments composant le souvenir, dans les modèles où une part de stockage subsiste. Thakral, Madore et Schacter (2019) font l'hypothèse que la vivacité des éléments combinant un souvenir épisodique corrélera avec dans la vivacité de l'épisode futur imaginé à partir de ces mêmes composants. Amenant une preuve de l'utilité des expériences passées comme base de la simulation du futur, cette hypothèse sous-tend que ce serait l'élément recombinaisonnel en lui-même qui contiendrait cette caractéristique d'épisodicité. Jacoby, Kelley et Dywan (1989) soulignent cependant que supposer le stockage de caractéristiques comme le degré de familiarité dans la trace mnésique est assez problématique par rapport aux observations effectuées chez les patients amnésiques. En effet, si la qualité du souvenir est attachée à ses composantes, comment est-il

possible de perdre l'aspect qualitatif, sans perdre le contenu ? La sémantisation du souvenir n'est alors plus aussi clairement expliquée par ce type de modèle. Il faut néanmoins souligner le problème récurrent et important de définition des termes. La vivacité d'un souvenir est-elle l'équivalent de la sensation de revivre ? Est-ce qu'elle en est la cause ? Le degré de familiarité d'une brique composant un épisode est-il différent de sa vivacité rapportée ? Quels éléments constituent l'épisodicité attribuée à l'hippocampe ? Au-delà de la définition, il semble nécessaire de s'accorder sur les consignes à donner aux participants pour leur expliquer ces caractéristiques. Il peut être assez difficile par exemple de faire dissocier aux participants, dans une mesure auto-rapportée, la notion de précision d'un souvenir de la vivacité de celui-ci ou encore de la notion de la confiance dans le fait que cet événement se soit déjà produit.

Sans recours à cette notion de stockage de la passivité, et si la mémoire et l'imagination sont envisagées comme deux tâches impliquant exactement le même processus, comment faire alors pour différencier une scène imaginée d'une scène vécue. Dans les deux cas, la scène est construite, mais dans le cas d'une scène vécue, cette construction a déjà eu lieu dans le passé. Ainsi, il suffit de pouvoir estimer si cette construction précise a déjà eu lieu pour savoir s'il s'agit d'une remémoration ou de l'imagination. Il convient d'écarter d'emblée l'idée d'une comparaison entre le résultat de la reconstruction actuelle et une quelconque trace d'une construction passée car ceci reviendrait alors simplement à faire appel à cette trace passée comme critère de passivité. L'estimation doit donc se fonder sur la dynamique du processus de construction lui-même. La fluence pourrait permettre une telle estimation. La fluence est un concept assez ancien qui a été tout d'abord désigné sous le nom de *perceptual enhancement* (Jacoby, 1983) dans le cadre restreint de la perception avec l'idée que la familiarité ressentie pour le matériel présenté expérimentalement pourrait être liée au traitement perceptif effectué pendant la tâche de reconnaissance. À un niveau plus général, la fluence est définie comme une facilité relative du traitement de l'information et le traitement n'est plus supposé être uniquement de nature perceptive. Cette fluence est due au bénéfice de refaire le même traitement, les mêmes opérations, et permettrait donc de différencier ce qui a déjà été traité par le système cognitif de ce qui n'a jamais été traité (i.e., ce qui est nouveau).

Cette fluence peut donc être engendrée par la manipulation de caractéristiques physiques de la stimulation (i.e., fluence perceptive) ou par une manipulation conceptuelle (i.e., fluence conceptuelle), visant toutes deux à moduler la facilitation perçue du traitement de l'information. Par exemple un mot cible au milieu d'un masque est plus difficile à lire qu'un mot non bruité, autrement dit son traitement est plus fluent. La fluence peut-être également due à une manipulation conceptuelle dans le cas d'une phrase qui, grâce à son contexte sémantique, peut

être qualifiée de hautement prédictible. Par exemple, dans la phrase *la mer déchaînée fit couler le bateau*, le mot *bateau* est plus facilement prédit que dans la phrase *j'ai économisé pour m'acheter un bateau*. Le traitement du mot *bateau* est donc plus facile dans la première phrase que dans la seconde, et cette facilité de traitement n'est pas liée à une caractéristique perceptive, bien qu'elle modifie la facilité perçue du traitement de la phrase.

Expérimentalement, cela peut conduire à de fausses reconnaissances, en jugeant un mot nouveau comme ayant été préalablement appris. Par exemple, les mots nouveaux non bruités sont plus facilement reconnus comme anciens que les mots nouveaux bruités. En effet, la facilité de traitement relative d'un mot non bruité par rapport à un mot bruité serait utilisée pour définir que ce mot a été traité auparavant et engendrer une fausse reconnaissance. La fluence est donc conceptualisée par Jacoby, Kelley et Dewan (1989) comme un processus d'attribution. En effet, lorsque la rapidité de traitement de l'information est perçue, elle peut être attribuée à une autre cause que celle du traitement préalable de la stimulation, autrement dit, être attribuée à autre chose qu'à la mémoire de ce traitement, et ne générer aucune fausse reconnaissance. C'est ce que démontre Whittlesea, Jacoby et Girard (1990). Dans leur expérience, ils répliquent l'effet de la fluence perceptive sur la reconnaissance mais mettent en évidence que, si le participant a connaissance de la manipulation du bruitage de la stimulation (servant à manipuler la fluence perceptive), l'effet disparaît. Les auteurs interprètent ce résultat comme la preuve qu'une attribution causale est effectuée sur la facilité de traitement perçue et que si la cause est attribuée à une manipulation externe alors l'illusion de mémoire n'a pas lieu. La fluence a donc trait à l'évaluation de l'interaction entre l'individu et l'environnement à un moment donné. La notion de relativité de cette facilité de traitement perçue est quant à elle mise en évidence expérimentalement par Westerman (2008). Les résultats mettent en évidence un impact de la fluence seulement lorsque la manipulation de cette fluence n'est présente que sur certains items et pas sur l'ensemble des items. Autrement dit, si la facilité de traitement est expérimentalement engendrée pour tous les items, elle n'est pas attribuée à un traitement préalable et n'engendre pas plus de fausses reconnaissances comparativement à une situation où aucune phrase n'a subi de manipulation de la fluence.

La fluence est une notion qui est supposée non seulement permettre l'attribution de l'épisode au passé, mais parfois également rendre compte des aspects qualitatifs attribués à la remémoration épisodique (Cerles et Rousset, 2012), et qui ferait que l'individu perçoit une différence entre une scène construite et une scène re-construite, soit entre un événement ancien et un événement imaginé. Pendant longtemps, la fluence a seulement été associée à la familiarité ressentie pour un item dans une tâche de reconnaissance. Or, dans une tâche de reconnaissance,

le jugement de nouveauté est supposé se baser plus sur la familiarité que sur la remémoration. Cependant, Cerles et Rousset (2012) démontrent que la fluence a un impact dans une tâche de reconnaissance uniquement sur les réponses qualifiées de *remember*. Dans cette expérience, les participants apprennent un chemin qui explore un environnement virtuel. Ensuite, dans une tâche de reconnaissance, des vidéos présentent soit un morceau du chemin appris soit un nouveau chemin. Les vidéos ne présentaient cependant pas la scène originale (i.e., peuplée d'objets comme des arbres, des maisons...), mais des indices qui permettaient sa reconstruction (i.e., les objets avaient été remplacés par des formes géométriques en 3D). La fluence perçue est manipulée en augmentant imperceptiblement la vitesse de présentation du chemin lors de la reconnaissance. Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse de présentation d'une vidéo lors de la phase de reconnaissance engendre plus de reconnaissances qualifiées de *remember* que de reconnaissances qualifiées de *know* mais uniquement pour les vidéos anciennes (i.e., présentant un morceau du chemin visionné à l'apprentissage). Cerles (2015) met en évidence que cet aspect de reconstruction lors de la reconnaissance, permis grâce à la présentation de vidéos qui ne montrent pas l'environnement original mais des indices de configuration de l'environnement original, est une caractéristique essentielle à la présence d'un effet de la fluence. En effet, lorsque la vidéo de reconnaissance présente l'environnement à l'identique par rapport à l'apprentissage, la fluence n'a plus pour effet d'augmenter les réponses *remember* mais les diminue. Les réponses *remember* sont moins présentes pour les items qui ont subi artificiellement une augmentation de la vitesse, perçue dans la version précédente de l'expérience comme un indice de l'apprentissage du chemin présenté. Ces résultats suggèrent une implication de la fluence dans la remémoration épisodique seulement lorsqu'un processus de reconstruction est nécessaire pour réussir la tâche.

Dans le cas de la remémoration épisodique, il est donc possible de faire l'hypothèse que lors de la construction d'une scène, la détection d'une fluence dans le traitement puisse indiquer si cette scène a déjà été vécue ou s'il s'agit de la première fois que ce traitement particulier est effectué. Une fluence dans le traitement peut être attribuée à la redondance de ce traitement précis, et comme le temps est unidirectionnel, si ce traitement précis a déjà été effectué, il l'a été dans le passé. Il n'est alors plus indispensable que les souvenirs soient extrêmement différents entre eux pour garantir que leurs réseaux puissent se réactiver de façon distincte et que l'événement soit revécu comme unique. En effet, il suffit que le traitement effectué à la remémoration soit celui effectué lorsque l'événement s'est déroulé et que la facilitation dans le traitement soit attribuée à la répétition de ce traitement précis.

IV- Conclusion

L'épisodicité est un fil conducteur dans la question du statut de la mémoire épisodique par rapport à d'autres activités de nature mnésique. Dans chacune des conséquences de la notion de construction sur l'appréhension du concept de mémoire épisodique, l'épisodicité est une caractéristique commune à toutes les problématiques. En effet, Tulving la définit comme une, voire la, caractéristique centrale dans la notion de remémoration épisodique et c'est ce qui différencierait cette forme de mémoire de toutes les autres et non plus son contenu. Ainsi, si la notion de singularité d'un épisode, d'une trace mnésique, est remise en question, comment peut-on expliquer cette sensation de revivre l'événement ? Si la mémoire épisodique n'est plus si différente de l'imagination ou de la projection dans le futur alors comment cela se fait-il que la sensation de revivre soit présente pour certains événements et pas d'autres ? Si la situation de remémoration prend une place de plus en plus importante (par rapport à la situation d'encodage) alors comment justifier cette sensation de reexpérencier si elle ne provient pas directement de l'expérience passée vécue via une trace singulière ?

Perrin et Rousset (2014) proposent une revue des principales définitions et théorisation de l'épisodicité. Tout d'abord, comme présenté au début de ce chapitre, Tulving met l'accent sur l'état de conscience qui accompagne la remémoration et suppose que c'est cette caractéristique qui différencie fondamentalement la mémoire épisodique d'autres formes de mémoire. Ainsi, la notion de *soi* et de *temps* ont été érigées en caractéristiques fondamentalement épisodiques pouvant être à l'origine de l'épisodicité. Comme le soulignent cependant Perrin et Rousset (2014), plusieurs contre-exemples s'érigent contre l'une et l'autre de ces caractéristiques comme origine de l'épisodicité. Par exemple, certaines expériences passées concernant le soi ne sont pas accompagnées de la sensation de revivre lorsqu'elles sont rappelées, il peut donc s'agir de connaissances sémantiques. Le soi n'est donc pas une caractéristique présente uniquement dans la remémoration épisodique, même s'il en constitue une dimension (Lin, 2018). Dans le cadre de la construction de scène, c'est d'une part le fait que celle-ci s'effectue du point de vue acteur, et non observateur, qui peut rendre compte de cette dimension dans le revécu d'un événement, mais aussi d'autre part la détection de fluence qui s'effectue lors de notre propre imagination ou re-construction.

La proposition que l'épisodicité soit reliée à la détection d'une fluence dans un processus d'imagination de scènes permet de rendre compte de l'aspect singulier du sentiment d'épisodicité, tout en s'inscrivant dans une logique continuiste entre imagination et mémoire

pour ce qui est du processus de construction. C'est-à-dire qu'il est possible d'avoir l'impression que la scène reconstruite correspond à un moment vécu du passé sans supposer que cette singularité soit le reflet de l'accès à une trace singulière contenant les éléments de l'épisode. Comme attendu dans toute position constructive la véracité du souvenir n'est bien sûr pas assurée et il faut donc accepter qu'il existe un compromis entre valeur adaptative de la mémoire avec une flexibilité et une adaptabilité à la situation présente et la possibilité de faux souvenirs engendrée par cette flexibilité. Les faux souvenirs seraient alors une conséquence de l'aspect constructif de la mémoire, et consisteraient en des erreurs d'attribution de la fluence perçue du traitement. Par exemple, Zaragoza et Mitchell (1996) mettent en évidence comment l'exposition répétée à une information (augmentant donc la fluence) peut mener à biaiser la remémoration. De nombreux facteurs peuvent engendrer une facilitation de traitement, et la cause perçue peut-être par erreur attribuée à la réalisation préalable de ce traitement précis.

Faire référence à une notion de scènes en plus de l'aspect constructif met naturellement en avant l'importance d'un processus spatial lors de la remémoration. Le contexte spatial a certes une place prépondérante lors de la remémoration épisodique, comme le démontrent les effets spatiaux en mémoire, mais la place qui lui est accordée dans les modèles est variable. Même si de nombreuses théories s'accordent sur le fait qu'un traitement spatial est nécessaire en mémoire épisodique, certaines le conçoivent comme ayant lieu lors de l'encodage, d'autres lors de la remémoration et d'autres encore proposent que ce traitement ait lieu à la fois pendant l'encodage et pendant la remémoration.

Si les données expérimentales vont plutôt dans le sens du caractère spatial du traitement impliqué en mémoire épisodique, la question de la nature de ce traitement reste ouverte. Les modèles proposent une grande variabilité de processus pouvant sous-tendre cette remémoration (e.g., fenêtre pariétale transformant l'information allocentrée en information égocentrée, processus relationnel, construction de scènes...). Les prédictions en termes de réseau cérébral activé dans les tâches sont cependant très similaires et ne permettent donc pas de supposer qu'une théorie a un pouvoir explicatif supérieur à celui d'une autre. Il est intéressant de noter que peu d'études comportementales chez le sujet sain sont menées pour opposer ces théories. Pour ce faire, il est nécessaire cependant que les modèles ne prodiguent pas seulement des hypothèses concernant l'origine des bases cérébrales communes, mais énoncent également des conséquences comportementales précises en fonction du processus de remémoration supposé. Cette limite a été mise en lumière lorsque la théorie de la simulation épisodique et celle de la

construction de scènes ont été comparées sur les questions du statut de l'imagination et des relations perception-mémoire.

Bien que cette comparaison soit encore difficile et incertaine pour ces deux modèles, il nous paraît possible d'opposer à un niveau plus général les théories qui supposent l'implication d'un processus de nature spatiale lors de la remémoration à celles qui supposent un processus non spatial. Sachant que tous les modèles supposent évidemment un traitement spatial du contenu de nature spatiale de l'épisode, il paraît alors nécessaire de demander un rappel du contenu non spatial de l'épisode, pour mettre en évidence un processus spatial propre à la mémoire épisodique lors de la remémoration. Si la présence d'un processus spatial est mise à jour pendant la remémoration, alors il faudra ensuite spécifier sa nature en affinant le paradigme expérimental. Pour étudier l'implication du processus spatial pendant la remémoration, il est possible d'avoir recours à un paradigme de double tâche, pour lequel une interférence est attendue lorsque les deux tâches réalisées en parallèle font appel au même processus. En effet, le paradigme de double tâche permet d'étudier les points communs entre une tâche spatiale et une tâche mnésique (dont on fait varier la nature). Dans ces expériences, le participant doit résoudre simultanément une tâche spatiale et une tâche de rappel épisodique. L'interférence est supposée se traduire par une variation dans les performances de l'une et/ou de l'autre tâche et cette diminution de performance est interprétée comme indiquant la présence de points communs dans la résolution des deux tâches.

Ce type de paradigme a cependant certaines limites. Pour commencer, il reste une composante mnésique dans la tâche spatiale. En effet, pour réaliser par exemple une tâche de pointage les yeux fermés, il faut avoir préalablement appris un pattern d'objets durant l'expérience. Cette composante mnésique pourrait interférer avec la remémoration épisodique. De plus, les deux tâches cognitives nécessitent une réponse explicite de la part du participant. Il faut alors les arranger dans le temps pour que le participant puisse séquentiellement répondre à l'une puis l'autre tâche. Avec cette configuration, il est possible d'alterner l'allocation de ressources à l'une puis l'autre tâche. L'interférence entre les deux tâches ne peut pas être mesurée car elles sont en fait réalisées séquentiellement. Utiliser la posture comme tâche spatiale en parallèle de la remémoration épisodique répond à ces deux limites. Tout d'abord, à l'échelle de l'expérience, aucune composante mnésique n'est impliquée dans cette tâche spatiale. Cela ne signifie pas qu'aucune mémorisation n'est nécessaire pour se maintenir dans une position donnée, mais qu'aucun apprentissage explicite n'est nécessaire pendant l'expérience pour réaliser cette tâche. De plus, le maintien postural est une tâche continue dans le temps qui ne demande aucune réponse explicite de la part du participant. Elle est donc

mesurée en continu en parallèle de la remémoration, ce qui rend possible la mise à jour de modifications temporaires. Autrement dit, même si la posture se modifie de manière intermittente, ces modifications auront un impact sur la moyenne des indicateurs, grâce à l'aspect continu de la mesure. Au contraire, une mesure ponctuelle peut ne pas mettre en évidence des modifications provisoires dans la réalisation de la tâche, car tout dépend alors du moment auquel est effectuée la mesure. Pour finir, cette situation de double tâche posture/cognition est tout à fait écologique et est réalisée tous les jours. Par exemple, je peux parler en marchant ou planifier ma journée tout en maintenant mon équilibre debout. Le chapitre suivant aura donc pour but de développer la notion de posture et de mesure posturale. Cette perspective est notamment soutenue, du point de vue de l'étude de la mémoire épisodique, par les données expérimentales qui soulèvent la question du lien entre le point de vue expérimenté lors de la remémoration épisodique et sa relation avec les informations sensorielles en provenance du corps.

Chapitre 2

LA POSTURE COMME MOYEN D'ÉVALUER LA PRESENCE D'UN PROCESSUS SPATIAL LORS DE LA REMEMORATION

Le contrôle postural a pour fonction à la fois de permettre le maintien de l'équilibre et de traiter la position et l'orientation du corps dans l'espace (Massion, 1994). L'intégration des informations sensorielles (i.e., visuelles, proprioceptives, somesthésiques, vestibulaires) joue un rôle déterminant dans le contrôle de la posture (Peterka et Loughlin, 2004). En effet, le maintien de la posture les yeux fermés qui supprime les informations visuelles (Edwards, 1946), l'oscillation du support qui perturbe les informations somesthésiques en provenance des jambes (Pyykkö, Aalto et Ishizaki, 1993) ou encore l'asservissement du support sur lequel se tient le participant, qui supprime les informations proprioceptives en provenance des chevilles (Clark et Riley, 2007) augmentent l'instabilité posturale. La stimulation électrique du système vestibulaire, montre que le contrôle postural s'effectue aussi sur la base des informations issues de ce système sensoriel car l'instabilité posturale augmente lors de sa perturbation (Petersen, Magnusson, Fransson et Johansson, 1994).

L'augmentation des oscillations posturales n'est pas seulement observée lors d'une suppression ou d'une modification des informations sensorielles mais également chez les personnes âgées en comparaison aux personnes jeunes (Era et Heikkinen, 1985). Cette diminution de l'équilibre postural pourrait être attribuée à des déficits sensoriels périphériques. Cependant, Teasdale, Stelmach, Breunig et Meeuwsen (1991) démontrent que lors du passage d'une situation où moins d'informations sensorielles sont disponibles (yeux fermés donc pas d'accès à la vision) à une situation où la disponibilité des informations sensorielles augmente (réouverture des yeux donc ajout d'informations sensorielles aidant au contrôle postural), les personnes jeunes sont capables de réduire leurs oscillations posturales alors que les oscillations

posturales chez les personnes âgées augmentent. Cette difficulté à s'adapter aux modifications des informations sensorielles disponibles pour contrôler la posture, et ce même lorsqu'il s'agit d'une augmentation des informations disponibles et non une diminution de ces informations, oriente l'hypothèse vers un déficit du mécanisme d'intégration. Ce mécanisme d'intégration serait géré par le système nerveux central, ce qui amène à l'hypothèse d'une pénétrabilité de la posture (Teasdale, Bard, Larue et Fleury, 1993). Le paradigme de double tâche, cognition-posture, permet de mettre à l'épreuve cette interaction supposée. La posture peut être à la fois maintenue grâce à des mécanismes dépendants d'activations au niveau de la moelle épinière dans un environnement prédictible, mais nécessite des activations cérébrales dans le cas de modifications nécessaires du pattern de maintien postural habituel (Lajoie, Tesdale, Bard et Fleury, 1993). Dans cet esprit, Lajoie et collaborateurs (1993) ont démontré que plus le maintien postural était difficile (maintenir la position assise, maintenir la position debout, marcher) plus les temps de réaction à une stimulation auditive augmentent. Ces résultats vont à l'encontre d'un contrôle postural entièrement automatisé.

Le paradigme de double tâche, la réalisation d'une tâche cognitive couplée au maintien postural, a donc été largement étudié afin de comprendre dans quelle(s) condition(s) une interaction entre ces deux activités pouvait-être mesurée, qu'elle se traduise par une interférence ou une facilitation. La question de l'origine de cette interaction a été soulevée, puis des modèles ont été proposés afin de prédire le sens ainsi que les variables modératrices de l'interaction. La situation de double tâche a plus récemment fait l'objet d'un intérêt dans le cadre de la cognition incarnée. Cette perspective théorique modifie à la fois la conception de la situation de double tâche mais également l'interprétation des données posturales. La mémoire fait partie des tâches cognitives ayant été étudiées sous l'éclairage de la théorie de la cognition incarnée, en association ou non au maintien postural.

I- Quelle est l'origine de l'interaction posture cognition ? De l'hypothèse d'un partage de ressources centrales vers l'hypothèse d'un partage de traitement spatial

A) L'hypothèse d'une capacité générale de traitement limitée

L'interaction entre cognition et posture peut, dans un premier temps, être conceptualisée comme une compétition pour des ressources centrales attentionnelles. Dans ce cadre, l'attention

est définie comme la capacité de traitement de l'information d'un individu, en mettant l'emphase sur la notion de limite dans la quantité de traitements pouvant être réalisés en parallèle (Woollacott et Shumway-Cook, 2002). Ainsi, si deux tâches sont effectuées en parallèle, mais que leurs demandes en termes de traitement dépassent la capacité attentionnelle totale de l'individu, alors un impact négatif sur la performance de l'une et/ou de l'autre tâche devrait être observé. Par exemple, Vuillerme et Nougier (2004) observent une augmentation des temps de réaction à la tâche de détection de cibles auditives lorsque le maintien de la posture se complexifie (assis, debout, debout sur un pied, debout sur un pied sur une surface souple). Cette dégradation des performances cognitives est donc expliquée par la demande attentionnelle croissante pour réaliser la tâche posturale, ce qui laisse de moins en moins de ressources pour la tâche cognitive.

Si les ressources attentionnelles sont limitées et que la posture et la tâche cognitive entrent en conflits pour l'accès à ces ressources, alors l'augmentation de la difficulté posturale augmentera la charge attentionnelle associée au maintien de l'équilibre. Dans ce contexte, les performances à la tâche cognitive devraient d'autant plus être détériorées par la situation de double tâche. De la même manière, plus la difficulté de la tâche cognitive augmente plus la charge attentionnelle nécessaire pour réaliser la tâche sera importante et donc plus la posture devrait être impactée négativement par la situation de double tâche. Lajoie et collaborateurs (1993) ont démontré une augmentation des temps de réaction à une tâche de détection de cibles auditives lors de l'augmentation de la difficulté du maintien de l'équilibre. Cependant, cet effet n'est pas toujours mis en évidence (Dault, Geurts, Mulder et Duysens, 2001). Yardley, Gardner, Bronstein, Buckwell et Luxon (2001) rapportent quant à eux à la fois un effet de la difficulté de la tâche sur la posture et un effet de la difficulté de la posture sur la performance aux tâches cognitives. Cependant, Lajoie, Frank et Allard (2001) mettent en évidence une modification du contrôle postural lors de l'augmentation de la difficulté de la posture, mais n'observent aucun effet de la complexification de la posture sur la performance cognitive ou de l'augmentation de la difficulté de la tâche cognitive sur le maintien postural. L'hypothèse de partage de ressources générales ne permet pas de prédire qui, de la posture ou de la cognition, sera impactée par la situation de double tâche.

Cette hypothèse de partage de ressources générales de traitement ne prédit qu'une dégradation possible des performances lors de la situation de double tâche de par le manque de ressources pour effectuer correctement le traitement demandé à la fois par la tâche cognitive et le contrôle postural. Cependant, des études mettent en évidence une diminution des oscillations posturales en situation de double tâche (Riley, Backer, Schmit, 2003) qui est interprétée comme

une amélioration de l'équilibre, en opposition à une augmentation des oscillations posturales qui est associée à une dégradation des performances posturales. Certains auteurs ont supposé que l'orientation de l'attention vers une tâche autre que le maintien postural pouvait améliorer le maintien de l'équilibre car la situation de double tâche engendrerait une automatisation du contrôle postural (Polskaia, Richer, Dionne et Lajoie, 2015). L'idée est que la réalisation de la tâche posturale est optimale lorsqu'elle est automatisée et que cette stratégie de contrôle postural n'est plus possible lorsque l'attention est portée sur la posture. Cette stratégie automatique du contrôle posturale permettrait de libérer de la capacité de traitement pour la tâche cognitive et ainsi maintenir la performance entre une situation de simple tâche et de double tâche.

À l'appui de cette hypothèse d'automatisation du contrôle postural, Vuillerme, Nougier et Teasdale (2000) observent un effet de la situation de double tâche sur la posture avec une diminution des oscillations posturales lorsqu'une tâche de détection visuelle ou auditive est réalisée pendant le maintien de l'équilibre. De plus, Deviterne, Gauchard, Jamet, Vançon et Perrin (2005) démontrent que chez les personnes âgées, la condition où la stimulation auditive a un intérêt pour la compréhension d'une histoire engendre plus de modifications posturales que lorsque le son n'a aucun sens sémantique. Ainsi, ce ne serait pas seulement la stimulation sensorielle qui induirait la diminution des oscillations posturales mais bien le traitement de la stimulation. De la même manière, lors d'une situation où la posture est perturbée grâce à une stimulation électrique appliquée au niveau du muscle du mollet (engendrant un déséquilibre mesuré grâce à une augmentation des oscillations posturales), une diminution des oscillations posturales liées à la perturbation est mesurée lors de la présence d'une tâche cognitive comparativement à une situation sans tâche cognitive (Andersson, Hagman, Talianzadeh, Svedberg et Larsen, 2002). De nouveau, la dégradation attendue n'est pas observée mais la focalisation sur une autre tâche semble promouvoir l'automatisation du contrôle postural.

B) L'hypothèse du partage d'un traitement de nature spatial entre posture et cognition

La variabilité des résultats interroge sur l'impact possible de la nature du traitement impliqué dans la résolution de la tâche cognitive. En effet, comme la posture est en partie définie comme le traitement de l'orientation du corps dans l'espace (Massion, 1994) il en découle donc la nécessité d'un traitement spatial dans le contrôle postural. Par exemple, Frank et Earl (1990) démontrent que la posture est impactée par les mouvements volontaires qui sont fondamentaux

dans l'interaction entre l'individu et l'environnement. Lors d'une tâche de recherche visuelle impliquant la détection d'un changement d'orientation, une influence de la position a été mise en évidence (Marendaz, Stivalet, Barraclough et Walkowiac, 1993), ce qui suggère une relation entre posture et traitement spatial. De plus, en comparant la posture de personnes jeunes et âgées, Maylor et Wing (1996) observent une augmentation des différences posturales dues à l'âge lors de l'ajout d'une tâche spatiale comparativement à l'ajout de tâches verbales ou attentionnelles.

Chez les personnes jeunes, Kerr, Condon et McDonald (1985) proposent de comparer la réussite à une tâche spatiale et une tâche non spatiale lorsque les participants sont assis ou debout en position de Romberg (i.e., les pieds positionnés l'un devant l'autre, avec les orteils du pied en arrière touchant le talon du pied de devant) sur une plateforme de force mesurant leur posture. Les auteurs utilisent les matrices de Brooks dans leur version spatiale et leur version verbale. Ces tâches seront classiquement réutilisées pour opposer traitement spatial et traitement verbal sur des stimuli équivalents (i.e., ici une série de phrases). Dans sa version spatiale, le participant doit placer des chiffres dans une matrice mentale de seize cases en suivant les instructions auditivement présentées. Le participant doit mentalement créer la matrice (dont la case de départ est prédéfinie) puis entend des phrases de type : dans la case en dessous mettez un deux. D'une phrase à l'autre, les indices de positions tels que « en-dessous, au-dessus, à droite, à gauche » sont utilisés pour indiquer la position du chiffre dans la matrice par rapport au précédent. Lorsque toutes les phrases ont été présentées, le participant doit compléter par écrit une matrice vide en positionnant les chiffres à la bonne place. Dans sa version verbale, les participants entendent les phrases mais cette fois-ci ils ne doivent pas remplir une matrice mentale mais retenir les mots clés non spatiaux. Dans les phrases, les indices de position spatiale ont été remplacés par des adjectifs non spatiaux, à savoir « rapide, lent, mauvais, bon ». Les phrases n'ont donc plus de sens spatial (e.g., dans la case rapide mettez un 2). Suite à la présentation des phrases, le participant doit compléter par écrit des phrases à trou en ajoutant les adjectifs dans l'ordre de leur présentation. Le nombre de phrases qui compose chaque essai varie entre les expériences et est souvent utilisé pour moduler la difficulté de la tâche. Les résultats montrent que les performances à la tâche spatiale sont moins bonnes en position debout qu'en position assise, mais que ce n'est pas le cas pour la tâche verbale. Ce résultat soutient l'hypothèse d'un partage de traitement spatial entre cognition et posture. Par contre, au niveau de la posture, si l'ajout d'une deuxième tâche engendre une diminution des oscillations posturales par rapport à la situation de simple tâche, cette diminution n'est pas spécifique à la tâche cognitive spatiale.

L'interprétation de cette interférence spécifique à la tâche spatiale mesurable sur les performances à la tâche cognitive n'est cependant pas aussi évidente car elle est modulée par la non-équivalence de la difficulté des tâches. La tâche spatiale étant la plus difficile, les auteurs font donc varier le nombre de phrases qui composent chaque essai. Pour la tâche spatiale, les participants entendent donc seulement 6 phrases alors que pour la tâche verbale, ils entendent 8 phrases, pour en augmenter la difficulté. Cependant, la version spatiale étant à la fois la tâche la plus difficile et la tâche interférant avec la posture, il est possible d'interpréter les résultats en termes de difficulté ou de charge cognitive car la réduction du nombre de phrases n'est peut-être pas suffisante pour ré-équilibrer la difficulté des deux tâches. D'autre part, les auteurs soulignent que les deux tâches peuvent amener à des stratégies similaires quand elles sont présentées successivement à un même individu. En effet, une stratégie verbale est possible pour la version spatiale des matrices, en retenant les mots cibles spatiaux dans l'ordre et en construisant le pattern lors du rappel, et une stratégie spatiale est possible avec la version verbale des matrices en faisant une correspondance entre les adjectifs non spatiaux et les indices spatiaux. Pour pallier cette uniformisation des stratégies entre les deux conditions, Kerr et collaborateurs (1985) utilisent un plan inter-sujets, la moitié des participants ne voient que la version verbale et l'autre moitié ne voit que la version spatiale, ce qui empêche le transfert de stratégie. La comparaison des oscillations posturales entre des individus différents, pour opposer traitement spatial et verbal, peut augmenter la difficulté à mettre en évidence un effet de la nature de la tâche sur la posture car les différences inter-individuelles dans le maintien postural sont importantes (Isableu, Ohlmann, Crémieux et Amblard, 2003).

L'interprétation en termes d'interférence de nature spatiale entre posture et cognition n'est pas la seule possible suite à ces résultats. En effet, les auteurs supposent que l'effet observé pour les matrices de Brooks spatiales sur la posture pourrait être dû à l'implication d'un processus d'imagerie mentale visuelle qui n'est pas présent dans la version verbale de ces matrices. Sachant que la vision est un sens important pour la régulation des oscillations posturales (Wade et Jones, 1997), et que l'imagerie visuelle interfère avec la perception visuelle (Segal et Fussella 1970), il est possible que la composante d'imagerie de la tâche spatiale soit à l'origine de l'interférence. Cette interférence serait alors seulement liée à l'acquisition d'informations sensorielles communes aux deux tâches. Il ne s'agirait donc pas d'un partage de processus entre tâche spatiale et maintien postural, mais plutôt de deux activités qui nécessiteraient le système visuel pour fonctionner. Même lors du maintien de la posture les yeux fermés, l'imagerie visuelle

aurait un impact sur la posture car tous deux impliquent le système visuel. D'ailleurs, Ramenzoni, Riley, Shockley et Chiu (2007) ont montré un impact sur les mesures posturales de la nature verbalisable (suite de lettres et chiffres, e.g., G6K9V4D) ou non (suite de symboles japonais) de l'information visuelle sur laquelle se base la tâche cognitive. Ainsi, l'implication de la vision dans la tâche cognitive semble jouer également un rôle dans l'interférence entre contrôle postural et tâche cognitive. Cependant, Vandervelde, Woollacott et Shumway-Cook (2005) proposent d'opposer deux types de traitement visuels pour estimer leur influence sur le maintien de la posture. Les auteurs soulignent l'importance des informations visuelles dans la gestion posturale, mais supposent que le traitement de la forme des objets est moins utile que la location spatiale des objets dans le maintien de la posture. Les deux tâches consistent à comparer deux stimulations visuelles présentées à quelques secondes d'intervalle, cependant la première consiste en une comparaison de deux formes alors que la seconde consiste en une comparaison de position de deux points dans l'espace. Les tâches s'effectuent soit en position assise soit debout en position de Romberg (les pieds positionnés l'un devant l'autre, avec les orteils du pied en arrière touchant le talon du pied de devant). Les résultats montrent que la posture n'est pas affectée par l'ajout d'une tâche cognitive, qu'elle soit facile ou difficile. Cependant, le temps de réponse moyen à la tâche de position est plus long lorsque la tâche est effectuée debout par rapport à la condition où la tâche est effectuée assise, alors que ce n'est pas le cas pour la tâche de comparaison d'objets. Cet effet n'est donc pas seulement dû à une composante d'imagerie visuelle, puisque lorsqu'elle est maintenue constante l'interférence est spécifique à la tâche de position. Ces résultats suggèrent alors un partage de traitements spatiaux entre la posture et la tâche cognitive.

La comparaison d'une version auditive d'une tâche spatiale (comparaison de localisation d'un son entre huit sources possibles) et d'une tâche objet (comparaison de la hauteur du son) démontre de nouveau que le traitement spatial est essentiel dans la compréhension de l'interférence entre cognition et contrôle postural. En effet, lorsque la stimulation est auditive, la posture est significativement modifiée par la version spatiale de la tâche cognitive (Woollacott et Vander Velde, 2008). La nature de la stimulation (auditive versus visuelle) ne change pas significativement les indicateurs posturaux lorsque la tâche n'est pas spatiale. La présence d'un traitement spatial semble donc être à l'origine de la présence d'une interférence. Chong, Mills, Dailey, Lane, Smith et Lee (2010) font l'hypothèse qu'avec des tâches comme la détection de cibles visuelles, les tâches de comptage d'apparition de stimulations visuelles ou encore la comparaison d'un stimulus visuel avec la stimulation qui la précède, couramment utilisées dans la littérature, l'interférence pourrait être due à un partage

de structure externe (ici l'acquisition d'informations via la rétine) et non à un partage de traitement au niveau cérébral. Les auteurs manipulent donc la demande de traitement visuospatial nécessaire pour maintenir la posture, avec une condition de faible demande (yeux fermés), de demande moyenne (yeux ouverts) et de forte demande (yeux ouverts avec asservissement visuel, c'est-à-dire que l'environnement visuel bouge dans le sens de l'oscillation posturale de sorte qu'il n'y ait aucun flux visuel généré par le mouvement). Les résultats mettent en évidence une diminution des performances pour la tâche cognitive spatiale (ici soustraction de sept en sept) lorsque le maintien de la posture nécessite un traitement visuospatial important. De plus, la différence dans l'adaptation de la posture au cours des essais dans la condition de forte demande visuospatiale en comparaison à l'adaptation posturale dans la condition avec un plus faible traitement visuospatial suggère qu'il s'agit bien d'un partage de traitement et pas seulement d'entrée sensorielle.

L'effet de la nature de la tâche sur la modulation de l'interaction entre cognition et maintien postural n'est cependant pas toujours mis en évidence (Dault et collaborateurs, 2001). Par exemple, Bergamin et collaborateurs (2014) rapportent même qu'une tâche verbale (compter à rebours à voix haute suite à une consigne auditive) pourrait avoir un plus grand impact sur la mesure posturale qu'une tâche d'imagerie visuelle (matrice de Brooks spatiale) ou arithmétique (calcul mental). Cependant, la tâche verbale qu'ils ont utilisée est une tâche de comptage à rebours. La résolution de tâches de calcul ou de comptage est parfois supposée basée sur une ligne mentale directionnelle (Longo et Lourenco, 2007) qui induirait une composante spatiale dans ces tâches mathématiques. Ces tâches de calculs peuvent donc être utilisées comme tâches spatiales dans la littérature de la double tâche (Chong et collaborateurs, 2010). Yardley et collaborateurs (2001) ne mettent pas non plus en évidence un effet spécifique du traitement spatial sur la posture. Une de leurs tâches spatiales consiste en un jugement de provenance d'un son dans un casque (droite ou gauche), l'autre consiste à déterminer si les aiguilles d'une horloge seraient du même côté (ou non) pour une heure donnée. Les tâches dites spatiales sont donc multiples et il est possible de questionner si la nature du traitement nécessaire pour réussir la tâche est ou non spatiale. Autrement dit, dans l'exemple de l'horloge, la tâche nécessite pour sûr de l'imagerie visuelle avec un traitement spatial centré sur l'objet, mais pas de traitement spatial par rapport à soi, c'est un traitement centré sur l'objet. Parfois, la réponse demandée est spatiale (i.e., droite ou gauche), mais le traitement nécessaire pour donner cette réponse n'est pas obligatoirement spatial et peut consister en une simple congruence de position entre le côté de la stimulation et celui de la réponse.

Bien que certains résultats semblent indiquer une importance du traitement spatial de l'information pour observer l'interaction entre tâche cognitive et posture, les données restent très variables. De plus, les effets de cette interaction semblent pouvoir s'observer à la fois sur les mesures posturales et les mesures comportementales aux tâches cognitives. Des modèles ont alors été proposés pour prédire sur quelle composante de la double tâche l'effet pourrait s'observer.

II- Comment prédire quelle tâche sera impactée par la situation de double tâche ?

A) L'hypothèse d'une priorisation de la tâche spatiale ou de la tâche cognitive pour l'accès aux ressources de traitements

La perspective d'un partage de capacité de traitement limité, qu'il soit général ou de nature spatiale, induit l'idée qu'en situation de double tâche, l'une d'entre elles aura priorité pour l'accès aux ressources de traitement. En conséquence, la performance de cette tâche prioritaire restera la même que lorsqu'elle est réalisée seule, mais l'autre verra ses performances diminuer à cause de la limitation des ressources qui lui sont allouées. Il est possible de concevoir que la priorité soit accordée à la tâche posturale de par le risque de perte d'équilibre si trop peu de ressources lui sont octroyées. Ce *posture first principle* (Muller, Redfern et Jennings, 2007) est cependant peu soutenu dans la littérature qui ne démontre pas une détérioration des performances mnésiques mais plutôt des modifications posturales lors de la double tâche. Ceci est également observé chez les personnes âgées chez lesquelles le risque de chute est plus important (Shumway-Cook, Woollacott, Kerns et Baldwin, 1997 ; Jamet, Deviterne, Vançon, Gauchard et Perrin, 2007). Hormis les travaux de Andersson et collaborateurs (2002) et Andersson, Yardley et Luxon (1998) cette tendance à prioriser la posture n'a pas été observée chez les jeunes adultes. Certaines recherches mettent même en évidence une tendance à prioriser la tâche cognitive chez les jeunes adultes (*cognitive first principle* ; Berger et Bernard-Demanze, 2011). La priorisation de la posture pourrait donc avoir lieu seulement si l'intégrité posturale est menacée (Lion et collaborateurs, 2014). La difficulté du maintien de l'équilibre permettrait donc de prédire si l'effet de la double tâche serait observable sur la posture (priorisation de la tâche cognitive car le maintien de l'équilibre est facile) ou sur la tâche cognitive (priorisation de la posture s'il y a un risque de déséquilibre ou de chute). Cette vision permet de concilier les résultats opposés pour les personnes jeunes et âgées pour une même

position (amélioration de la posture pour les personnes jeunes et dégradation de la posture pour les personnes âgées). En effet, des situations posturales perçues comme stables chez le sujet jeune pourraient être plus difficiles à maintenir pour les personnes âgées. Cependant, Barra, Bray, Sahni, Golding et Gresty (2006) mesurent pour la première fois chez le sujet sain la prévalence des chutes lors d'une situation de double tâche dans laquelle la difficulté du maintien postural (position en Romberg sur une poutre en faisant varier la distance entre les deux pieds) et la difficulté de la tâche cognitive sont manipulées. Les résultats montrent que la présence d'une tâche spatiale engendre plus de chutes que la situation de simple tâche alors que ce n'est pas le cas dans la tâche verbale. Ainsi, ces résultats vont à la fois dans le sens d'un partage de traitement spatial entre la cognition et la posture, mais vont également à l'encontre du *posture first principle* qui prédirait une diminution des performances cognitives dans l'optique d'éviter une chute et de maintenir l'intégrité posturale.

La variabilité des effets de la tâche cognitive sur la mesure posturale amène à la conceptualisation d'une interaction non linéaire entre la posture et la cognition qui pourrait dépendre de la difficulté de la tâche cognitive (Riley, Baker et Schmit, 2003). Ainsi, les tâches cognitives faciles éloigneraient l'attention du maintien postural ce qui induirait une amélioration des ajustements posturaux par le biais d'un recours à des processus automatiques. Cependant, lorsque la tâche cognitive devient très difficile la posture serait impactée négativement, car la tâche cognitive demanderait trop de ressources. Huxhold, Li, Schmiedek et Lindenberger (2006) démontrent que l'effet de la tâche cognitive sur la posture a une forme en U chez les personnes âgées, c'est-à-dire que la posture peut être améliorée ou détériorée par la présence d'une deuxième tâche, et que la difficulté de la tâche cognitive permet de prédire le sens de la modification des indices posturaux.

B) La question de l'utilité fonctionnelle du maintien postural pour la réalisation de la tâche cognitive

L'hypothèse d'une priorisation ne prend pas en compte que la posture est rarement maintenue sans la présence d'une tâche cognitive en parallèle dans la vie quotidienne. Ainsi, la conceptualisation de la double tâche s'est orientée vers l'idée que, pour prédire le sens de l'effet de la tâche cognitive sur la posture, il fallait déterminer comment les deux tâches allaient être intégrées pour être contrôlées de manière uniforme et non plus comme deux entités indépendantes (pour une vision de complémentarité des processus cognitifs en situation de double tâche voir Bonnet et Baudry, 2016). Stoffregen, Hove, Bardy, Riley et Bonney (2007)

soulignent que les prédictions des modèles de compétition pour des ressources centrales sont peu souvent soutenues par les données expérimentales car le sens de l'effet (i.e., augmentation ou diminution des performances) n'est pas prédit précisément. De plus, dans une situation de double tâche, en fonction du but comportemental, la posture peut être sacrifiée (e.g., pour attraper une balle) au même titre que la cognition (e.g., s'arrêter de lire pour restaurer son équilibre) et ce chez une même personne et dans une même situation.

L'hypothèse d'intégration fonctionnelle propose alors de différencier la demande cognitive de la demande perceptive, avec l'idée que la posture sera réalisée d'une manière qui facilite la réalisation de la seconde tâche. Les modifications posturales dans le cas du mouvement volontaire sont un bon exemple d'adaptation fonctionnelle de la posture (Bouisset et Zattara, 1981 ; Yoshida, Nakazawa, Shimizu et Shimoyama, 2007). Ainsi, Stoffregen et collaborateurs (2007) supposent que la diminution des oscillations posturales sera présente seulement si elle permet une meilleure réalisation de la tâche dite *supra-posturale*. Les auteurs émettent donc l'hypothèse que cette diminution des oscillations posturales sera mesurable dans le cadre d'une tâche perceptive (e.g., recherche de cible visuelle) et pas lorsque la tâche cognitive ne nécessite aucun input sensoriel (e.g., compter). Leurs résultats montrent que ce n'est pas la difficulté de la tâche cognitive qui module les oscillations posturales mais la précision associée à l'exploration visuelle. Plus la précision nécessaire pour réussir la tâche perceptive augmente plus les oscillations posturales diminuent. Au contraire, l'augmentation de la difficulté de la tâche de comptage à rebours n'engendre aucune modification posturale. La charge mentale ne semble donc pas être à l'origine de l'impact de la double tâche mesurée sur la posture.

Le contrôle postural n'est pas, dans le cadre de cette théorie, conceptualisée comme une tâche en soi, mais comme permettant d'atteindre l'objectif d'une tâche supra-posturale. Stoffregen, Smart, Bardy et Pagulayan (1999) démontrent dans une série d'études que la posture est influencée par la localisation de la cible à fixer (proche versus loin) et non de la surface visible (qui reste la même dans toutes les conditions avec la présence dans le champ visuel des deux cibles potentielles). Les auteurs concluent que le flux sensoriel visuel n'est pas le seul à moduler les oscillations posturales d'une façon indépendante de la tâche cognitive (car il est maintenu constant entre les conditions) mais qu'une tâche perceptive peut également influencer le contrôle postural. Cependant, les mouvements oculaires peuvent avoir un effet sur la réduction des oscillations posturales (Rey, Lê, Bertin et Zapoula, 2008). Ils pourraient donc constituer une explication alternative aux modifications posturales, avec l'idée que la diminution des oscillations est nécessaire pour que le système oculomoteur effectue un

mouvement qui atteint la cible visée, d'une saccade par exemple (Oblak, Gregoric et Gyergyke, 1985). Dans leur expérience, Stoffregen, Pagulayan, Bardy et Hettinger (2000) montrent que la diminution des oscillations est bien de nature fonctionnelle et donc que la posture est modulée dans le but de réaliser une tâche cognitive et non à cause des mouvements oculaires. Pour cela, ils comparent une situation dans laquelle le participant doit explorer une feuille blanche à une situation où le participant doit compter le nombre d'apparitions d'une lettre dans un texte. Il s'agit bien de deux tâches perceptives impliquant des mouvements des yeux, mais c'est la tâche de recherche visuelle qui est assortie d'une plus faible quantité d'oscillations par rapport à la tâche d'exploration. Ces résultats montrent que la tendance n'est pas toujours à la diminution des oscillations, et qu'il est possible de prédire la présence de cette diminution en fonction du but à atteindre. Stoffregen, Smart, Bardy et Pagulayan (2014) mettent en évidence que la posture peut être contrôlée dans le but de faciliter la perception visuelle en manipulant la distance de cibles visuelles. Les auteurs interprètent les variations posturales comme l'indice que le contrôle postural est utilisé pour stabiliser la fixation, donc que la stabilisation posturale est mise au service de la tâche perceptive. Jusqu'à présent, la perception visuelle avait été conceptualisée comme étant au service de la stabilisation posturale et non l'inverse. Cette hypothèse ne rend cependant pas compte de l'effet de la difficulté de la tâche d'empan mesurée sur la posture par Riley, Backer et Schmit (2003). De plus, Mitra (2003), avec une tâche de recherche visuelle de cibles, observe une augmentation des oscillations posturales. Ce résultat va à l'encontre de la théorie supposant que la posture aurait un rôle facilitateur, au service de la réussite d'une autre tâche supra-posturale. L'auteur souligne également le manque de prédictions de la théorie concernant les performances cognitives lors de la double tâche.

Mitra (2004) propose un modèle de partage adaptatif des ressources pour pallier la dichotomie (i.e., vision pour la posture ou posture pour la vision) du modèle de Stoffregen et collaborateurs (1999, 2000) et son manque d'exhaustivité au regard de la variabilité d'issues possibles en situation de double tâche. En effet, Mitra (2004) classe les études en situation de double tâche en trois catégories d'interférences possibles, qui sont également des formulations différentes des enjeux de cette situation de double tâche. Il est en effet possible d'observer un effet de la tâche cognitive sur la performance à la tâche posturale, ou un effet de la posture sur la performance à la tâche supra-posturale. Dans ces deux cas, la double tâche est étudiée sous l'angle de la hiérarchisation des tâches. Enfin, la troisième possibilité réside dans l'idée d'un partage de ressources sensorielles impliquant un conflit (e.g., la vision) ou d'un partage de traitement cognitif (e.g., traitement spatial, capacité en mémoire de travail...). Le paradigme de

double tâche est dans ce dernier cas plutôt utilisé pour questionner la nature de l'interférence qui peut être mesurée. Le modèle de partage adaptatif des ressources prend donc en compte plusieurs variables dans la question de l'issue de la situation de double tâche : (a) la précision requise pour réaliser chacune des deux tâches, (b) l'utilité des informations perceptives, (c) la complexité de l'acquisition simultanée de ces informations pour chacune des deux tâches (e.g., si elles demandent toutes deux l'acquisition d'informations visuelles différentes), (d) la charge cognitive associée à chaque tâche. Il s'agit d'une généralisation du modèle de partage de ressources qui tient compte de l'effet facilitateur de la posture dans la réalisation de la tâche cognitive (i.e., posture au service de la perception). Le modèle prédit donc trois patterns d'oscillations posturales possibles. Le pattern de facilitation s'observe lorsque le maintien de l'équilibre est facile et que la tâche supra-posturale demande une grande précision. Ce pattern est celui observé dans les expériences de Stoffregen et collaborateurs présentées ci-dessus. Le pattern hybride implique à la fois une automatisation et une facilitation du contrôle de la posture. Il s'observe lorsque le maintien postural devient plus complexe sans pour autant compromettre les performances cognitives. Enfin, le pattern automatique est observé lorsque le maintien postural devient trop difficile et que toutes les ressources attentionnelles lui sont allouées pour ne pas perdre l'équilibre (dans ce cas, la tâche cognitive peut même être interrompue). La variabilité des prédictions et le grand nombre de prédicteurs questionne sur la facilité d'utilisation de ce modèle dans un paradigme expérimental nouveau. Son apport explicatif de la situation de double tâche posture-cognition est également questionnable puisque le modèle repose toujours sur l'hypothèse d'un partage de ressources générales limitées qui a déjà montré ces limites exposées dans la partie précédente.

III- Qu'en est-il des situations de double tâche qui impliquent des tâches de mémoire ?

Dans cette thèse, l'intérêt se tourne vers la conceptualisation de la mémoire. Mais quelle place ont tenue les tâches mnésiques dans l'étude des situations de double tâche cognition-posture ? Il est nécessaire ici de distinguer les tâches de mémoire à court terme de celles de mémoire épisodique car les demandes, en termes de traitement, liées aux tâches choisies sont différentes. De plus, ces expériences peuvent être différenciées en fonction de la question qu'elles posent quant à la situation de double tâche. Dans le cas des tâches de mémoire à court terme, l'intérêt se porte sur la différenciation possible de la phase d'encodage de la phase de maintien de l'information via l'impact qu'elles ont sur la tâche de posture. Comme dans les

expériences présentées jusque-là, le paradigme oppose des situations de simple tâche à des situations de double tâche et des variables modératrices comme la nature sensorielle (i.e., visuelle versus auditive) des informations présentées ou les traitements impliqués dans la tâche (i.e., spatial versus verbal) sont manipulées. Dans le cadre de la mémoire épisodique, l'idée se situe plutôt dans la modulation des performances à la tâche cognitive grâce à des manipulations posturales.

A) La mémoire à court terme

Les références à la mémoire de travail et au modèle de Baddeley sont nombreuses dans la littérature de la double tâche (Dault, Frank et Allard, 2001 ; Kerr, Condon et McDonald, 1985 ; Maylor et Wing 1996 ; Shumway-Cook et collaborateurs, 1997 ; Vander Velde, Woollacott et Shumway-Cook, 2005), mais ces études n'ont pas pour but de proposer des points communs entre une tâche de mémoire et le maintien postural. En effet, la mémoire de travail a surtout été utilisée pour opposer traitement spatial, verbal et charge attentionnelle. De plus, la mémoire de travail consiste par définition en une manipulation des informations à maintenir. Par exemple, maintenir une suite de chiffres pour la rappeler dans l'ordre de présentation impliquerait plutôt la mémoire à court terme, alors que rappeler les chiffres dans l'ordre croissant ou dans l'ordre inverse impliquerait plutôt la mémoire de travail car le simple maintien de l'information présentée ne suffit pas à réussir la tâche. Dans le domaine de la double tâche, c'est surtout la dimension de maintien qui est utilisée en parallèle de la mesure posturale et les résultats sont interprétés en termes d'effet de la nature des informations présentées (visuelles versus auditives) ou de la nature du traitement impliqué dans la réalisation de la tâche (spatiale versus verbale) sur le contrôle postural. Aucune hypothèse d'implication spécifique de la mémoire de travail ou de la mémoire à court terme dans le maintien de l'équilibre n'est posée. Autrement dit, la tâche mnésique (dans le sens du maintien d'informations non perceptivement présentes) est une tâche comme une autre, utilisée pour opposer les variables d'intérêts (e.g., niveau de charge cognitive). Ainsi dans les expériences présentées jusque-là, la mémoire n'avait pas de statut particulier dans la considération de l'interférence entre la posture et la cognition.

Certaines études s'intéressent à la mémoire à court terme, notamment aux différences entre une phase d'encodage et de maintien de l'information dans l'interférence posture-cognition. Mujdeci, Turkyilmaz, Yagcioglu et Aksoy (2016) étudient l'effet du maintien d'informations en mémoire de travail. Comparativement à une simple tâche, les oscillations posturales augmentent lors du maintien d'informations en mémoire à court terme. Toutefois,

les auteurs ne mettent en évidence aucun effet du nombre de chiffres à maintenir en mémoire sur les oscillations posturales et ne répliquent donc pas l'effet de la difficulté de la tâche cognitive sur la posture. La faible difficulté de toutes les conditions de la tâche d'empan peut expliquer l'absence d'effet de la difficulté. Par exemple dans cette étude, la tâche facile consiste à maintenir une suite de chiffres d'une longueur égale à la moitié de l'empan et la version difficile est composée d'une suite de chiffres d'une longueur égale à l'empan. L'empan étant défini et mesuré comme le nombre maximal d'éléments pouvant être maintenu en mémoire à court terme, une version difficile de la tâche pourrait consister en une présentation d'un nombre d'éléments supérieur à l'empan. De plus, aucun effet de la modalité de présentation (auditive versus visuelle) n'a été observé sur les oscillations posturales. Cependant, aucune analyse n'a été reportée sur les performances à la tâche cognitive à cause du trop faible taux d'erreur, ce qui va dans le sens d'une faible difficulté des tâches. Dans la littérature, cette interférence posture-cognition est parfois observable uniquement sur les performances cognitives qui n'ont pas été analysées dans cette expérience du fait de l'effet plafond. Ainsi, il est difficile de conclure en une absence totale d'interaction entre posture et mémoire à court terme sur la seule base de ces résultats.

À l'aide des matrices de Brooks, Maylor, Allison et Wing (2001) explorent la différence potentielle d'effet de la double tâche entre la phase d'encodage et la phase de maintien des informations en mémoire à court terme. Les résultats semblent montrer que la tâche cognitive a un effet sur le maintien postural mais que l'inverse n'est pas vrai. Les effets de la nature de la tâche sur la variabilité et la vitesse des oscillations posturales ne sont pas équivalents lors de l'encodage et lors du maintien. Alors que seule la tâche spatiale se différencie de l'absence de tâche pendant l'encodage, les trois tâches diffèrent lors du maintien au niveau de la mesure posturale. En effet, lors de l'encodage, un plus grand déséquilibre postural est mesuré pendant la présentation de la tâche spatiale en comparaison à la tâche verbale. Au contraire, la situation de double tâche engendre un déséquilibre par rapport à la posture seule lors de la phase de maintien de l'information en mémoire quelle que soit la nature de la tâche. Ces résultats pourraient être interprétés comme soutenant l'hypothèse du partage d'un traitement spatial entre cognition et posture, avec l'idée que le processus spatial a lieu pendant l'encodage (i.e., lors de la construction mentale de la matrice) alors que pendant le maintien il s'agirait d'une opposition entre répétition mentale (suite de mots dans la tâche verbale) et imagerie visuelle (maintien du pattern de chiffre dans la matrice pour la tâche spatiale). Les limites liées à l'utilisation des matrices de Brooks, évoquées plus haut dans ce chapitre, ne permettent pas de conclusion

satisfaisante de ces résultats, d'autant plus que les participants prenaient part aux deux conditions ce qui augmente le risque de transfert de stratégie.

Les expériences n'opposent pas une condition impliquant une mémorisation à une condition n'en nécessitant pas, ce qui ne permet pas de conclure sur le partage de traitement entre mémoire et contrôle postural. De plus, les différences observées entre la phase d'encodage et de maintien en mémoire à court terme pourraient être expliquées par la présence d'informations sensorielles (visuelles ou auditives) dans la phase d'encodage qui sont absentes lors du maintien.

B) La mémoire épisodique

L'étude de la posture couplée à une tâche de mémoire épisodique a été étudiée pendant la présentation des stimuli à retenir, avec l'idée d'une priorisation nécessaire d'une tâche sur l'autre, qui sera ensuite observée sur les performances en rappel ou la dégradation posturale pendant l'apprentissage. L'effet de détérioration des performances de rappel attendue lors de la présence d'une demande posturale au moment de l'encodage est compatible avec les modèles de stockage. En effet, cela suppose qu'il est possible de modifier la trace au moment de son encodage mais qu'il est moins aisé de jouer sur la trace au moment du rappel (qui serait une relecture à l'identique de ce qui a été stocké). Li, Lindenberger, Freund et Baltes (2001), s'intéressent à l'effet de la marche durant l'encodage d'une liste de mots sur les performances ultérieures en rappel. Leur but n'est cependant pas de mettre à jour des points communs entre la posture et la mémoire épisodique, mais d'étudier la supériorité d'une tâche sur l'autre lorsque la situation devient plus complexe. Avec l'âge, un déclin, à la fois sur le plan sensori-moteur et cognitif, est observable même dans le cas du vieillissement normal. Ainsi, les auteurs comparent les différences de priorisation des tâches entre les sujets jeunes et les sujets âgés. L'hypothèse est une priorisation de la posture chez les personnes âgées, pour lesquelles le risque de tomber est plus grand, et donc pour lesquelles le maintien de la posture représenterait une nécessité immédiate d'une grande importance. Au contraire chez les personnes jeunes, cette priorisation ne s'observerait pas. Les résultats montrent une modification des stratégies lors de la double tâche en fonction de l'âge, avec une priorisation de la posture pour les personnes âgées. Cette priorisation de la posture est interprétée sur la base d'un coût de la double tâche plus grand pour la tâche posturale que pour la tâche mnésique, c'est-à-dire que la diminution des performances mnésiques entre la simple tâche et la double tâche est plus grande pour les personnes âgées comparativement aux personnes jeunes. Les auteurs voient dans cette configuration d'allocation

des ressources une preuve en faveur de l'hypothèse que les personnes âgées recrutent des processus cognitifs pour maintenir leur équilibre, mais que chez les jeunes, le domaine cognitif et sensori-moteur pourrait être plutôt différencié. L'implication d'un traitement spatial pendant l'apprentissage pourrait également expliquer ces résultats. En effet, les participants sont encouragés à utiliser la méthode des *loci* lors de l'encodage pour retenir un maximum de mots. Cette méthode consiste à positionner les mots présentés dans un lieu très familier en suivant un chemin parcourant ce lieu (e.g., j'arrive par la porte d'entrée et je mets le mot *bateau* au niveau du hall, puis je tourne à droite dans le salon où je pose le mot *girafe* sur le pot de fleurs etc...). Lors du rappel, il est alors conseillé de suivre le même chemin qu'à l'apprentissage pour se retrouver mentalement à tous les endroits contenant des mots pour pouvoir les rappeler. Cette stratégie est hautement spatiale et implique un déplacement dans un espace mental ce qui pourrait expliquer le choix que doit faire l'individu de prioriser une tâche par rapport à l'autre. Autrement dit, la tâche d'apprentissage peut donc être vue comme une tâche de navigation mentale et la tâche posturale comme une tâche de marche réelle, ce qui entrave leur réalisation en parallèle.

D'autres auteurs se sont intéressés à la remémoration, pour montrer un impact de la posture lors du rappel, avec l'idée que la situation présente peut influencer sur le processus de remémoration épisodique. Cette hypothèse est compatible avec une vision située de la cognition. Dijkstra et collaborateurs (2007) demandent aux participants de se remémorer des événements (e.g., un rendez-vous chez le dentiste) dans différentes positions (e.g., couché, debout). Les auteurs émettent l'hypothèse qu'une position congruente avec la position tenue dans le souvenir faciliterait la remémoration et devrait conduire à des temps de réponse plus courts que dans la condition d'incongruence entre la position actuelle et la position associée au souvenir. Les résultats montrent en effet que la remémoration est plus rapide dans la condition de position congruente relativement à la condition de position incongruente. Ces résultats démontrent que la position actuelle peut amorcer le rappel d'un événement passé, et donc qu'une composante posturale est probablement présente dans le souvenir. En effet, seule la présence d'une composante sensori-motrice dans le souvenir peut expliquer que la position actuelle ait un impact sur le rappel d'un épisode passé. Cependant, les auteurs ne supposent pas de processus ou de traitement commun entre la remémoration épisodique et la posture. La position n'oriente pas ici le contenu de la remémoration, dans le sens où l'événement à rappeler est prédéfini et attribué aléatoirement à chaque position, mais la rapidité d'accès au souvenir est modulée par la congruence de position. Dans leur expérience, Michalak, Rohde et Troje (2015) modifient également la posture lors du rappel mais à l'aide d'un feed-back biaisé. La

démarche des participants est soit ajustée comme une démarche joyeuse soit comme une démarche triste. Le but ici est de montrer une orientation du contenu du rappel dans le sens d'une congruence entre le contenu et la nature de la démarche. Les résultats montrent que la démarche oriente le rappel de mots appris. La démarche joyeuse amène à une différence de rappel moins importante entre les mots négatifs et les mots positifs que la démarche triste. Il s'agit d'une diminution du biais de négativité classiquement mesuré chez les jeunes. Ce biais de négativité s'observe chez les jeunes adultes dans d'autres tâches que des tâches de mémoire, par exemple dans l'exploration visuelle de scènes émotionnelles (Kappes, Streubel, Droste et Folta-Schoofs, 2017). Ainsi, cette expérience ne met peut-être pas en évidence un lien entre la remémoration et la posture, mais un lien entre la posture et le traitement des émotions. Autrement dit, cette réduction du biais de négativité grâce à la démarche pourrait peut-être également s'observer dans une tâche perceptive et ne pas être spécifique à la remémoration épisodique. Comme dans le cas de l'expérience précédente, le traitement effectué lors de la remémoration n'est pas supposé commun avec le contrôle postural, il s'agit plutôt ici d'une congruence de contenu émotionnel.

Ces résultats expérimentaux tendent à montrer que la remémoration est un processus qui a lieu dans le moment présent et qui sera donc impacté par la situation présente. Il ne s'agit donc pas d'une simple réactivation indépendante du contexte, de l'environnement dans lequel a lieu la remémoration (pour une vision située de la remémoration voir Glenberg, 1997). Cependant, il s'agit toujours d'une manipulation de la congruence entre la situation présente et le souvenir à rappeler. Dans ces expériences, le traitement nécessaire au contrôle postural n'est pas supposé analogue à celui mis en jeu lors de la remémoration épisodique. De plus, il faut également démontrer que l'impact de la posture sur la tâche mnésique est spécifique à la remémoration épisodique et ne peut pas être mis en évidence lors de la réalisation d'autres types de tâches mnésiques n'impliquant pas ce processus de remémoration. Grâce à des manipulations de la situation dans laquelle s'effectue la remémoration, dont on suppose qu'elles auront un effet différent sur la remémoration épisodique et le rappel de connaissances générales, il serait alors possible de montrer que la remémoration épisodique partage un processus spatial avec le maintien postural.

C) La mesure posturale comme indice de l'incarnation d'une tâche cognitive

La mesure des modifications des oscillations posturales n'a pas seulement été utilisée pour étudier les situations de double tâche et conceptualiser comment le système résout le conflit pour des ressources ou pour un type de traitement, mais également récemment comme marqueur de l'incarnation d'un traitement cognitif. Dans cette optique, le signal postural est conceptualisé comme un potentiel reflet d'une activité cognitive et il serait donc possible de mettre en évidence une correspondance entre la posture et la cognition. De ce fait, dans les expériences qui suivent, il ne s'agira plus d'opposer une situation de simple tâche avec une situation de double tâche, ou de comparer des tâches de nature différente (e.g. spatiale versus verbale) mais de prédire la forme du signal postural en fonction de l'activité cognitive réalisée en parallèle. La mesure posturale n'est donc plus interprétée en termes de dégradation ou de facilitation entre une situation où elle est réalisée seule et une situation où elle entre en compétition avec une tâche cognitive, mais en termes de correspondance entre le profil postural mesuré et le profil postural attendu.

Dans les théories cognitivistes, la cognition est conceptualisée comme reposant sur des représentations amodales et abstraites. Cependant, dans les théories incarnées, la cognition est réfléchie comme dépendante du corps dans lequel elle prend racine. Autrement dit, les représentations qui servent de base à la cognition seraient modales (pour un aperçu global de la cognition incarnée voir Barsalou, 2008). Ainsi, mesurer la posture pendant la réalisation d'une tâche cognitive permettrait d'évaluer si elle est ancrée dans le système sensori-moteur, base de nos interactions avec le monde extérieur, et permettrait d'évaluer la nature modale des représentations manipulées pendant la résolution de la tâche. Naturellement, les tâches d'imagerie motrice ont intéressé les chercheurs. En effet, il est facilement concevable qu'une tâche d'imagerie motrice impacte la posture si les représentations manipulées lors de l'imagerie sont de nature motrice. Au contraire, aucun effet n'est attendu si la tâche se base sur des représentations amodales, et peut donc être réalisée indépendamment du système sensori-moteur. Lors d'un mouvement volontaire, des corrections posturales sont appliquées en prévision de l'effet du mouvement sur le maintien de la posture (Hodges et Richardson, 1997). Pour évaluer l'effet de la composante motrice de l'imagerie et contrôler sa composante visuelle, la plupart des études opposent une condition dans laquelle le participant doit s'imaginer en train d'effectuer lui-même le mouvement (imagerie kinesthésique) à une condition dans laquelle il doit imaginer regarder une autre personne effectuer ce même mouvement (imagerie visuelle).

Par exemple, Stins, Schneider, Koole et Beek (2015) manipulent à la fois le type d'imagerie et la partie du corps recruté pour le mouvement imaginé. Ils démontrent un effet de l'imagerie motrice sur la posture pour des mouvements imaginés impliquant le bas du corps (e.g., faire du vélo, sauter), mais pas pour l'imagerie motrice de mouvements impliquant le haut du corps (e.g., applaudir, jouer du piano). De plus, la condition d'imagerie visuelle n'a aucun effet sur la posture quel que soit le segment corporel impliqué par l'imagerie (e.g., imaginez regarder quelqu'un faire du vélo ; pour une revue de la littérature voir De Souza et collaborateurs, 2015).

Les tâches motrices ne sont cependant pas les seules à avoir été étudiées en parallèle de la posture. Si l'hypothèse que les tâches motrices pourraient modifier la posture de par leur caractère incarné est émise, plus particulièrement avec l'hypothèse d'une simulation du mouvement lors de l'imagination, d'autres tâches pourraient également reposer sur des représentations sensori-motrices. Par exemple, il est généralement supposé que les nombres s'organisent le long d'une ligne mentale directionnelle avec les plus petits nombres vers la gauche et les plus grands vers la droite. Ainsi, les mouvements du corps pourraient orienter des tâches impliquant des nombres. En effet, les mouvements du corps vers la droite induisent la génération de chiffres aléatoires plus grands que les mouvements vers la gauche. Ces résultats sont présents même si les informations vestibulaires sont les seules présentes (i.e., mouvement passif les yeux fermés, Hartmann, Grabherr et Mast, 2012) lorsque seule la tête est tournée (Loetscher, Schwarz, Schubiger et Brugger, 2008) ou lors d'un mouvement des bras (Cheng, Ge, Andoni, Ding et Fan, 2015). Dans ces expériences, c'est la réalisation de la tâche cognitive qui est modulée par l'implication du corps dans un mouvement. Ce qui est intéressant ici c'est qu'il n'est pas possible de conclure en une dégradation ou une amélioration de la tâche de génération aléatoire de chiffres. Il est seulement possible de souligner les modifications dans cette génération qui n'est en soi ni meilleure ni pire que la génération de chiffres en l'absence de mouvement du corps.

Dans le domaine de la mémoire, Miles, Nind et Macrae (2010) proposent que le voyage mental dans le temps, supposé à l'œuvre lors de la remémoration épisodique et la projection dans le futur, soit incarné dans le système sensori-moteur. Le plus souvent, une flèche sert d'analogie pour parler de la représentation du temps, le futur est conceptualisé comme devant l'individu et le passé derrière lui. Les participants effectuent donc deux tâches, une impliquant le passé et l'autre le futur, pendant une mesure de sa position sur l'axe antéro-postérieur (i.e., avant-arrière). Soit, ils ont pour consigne de se rappeler un événement passé qui s'est déroulé quatre ans en arrière, soit d'imaginer un événement qui pourrait se produire quatre ans plus tard. Les résultats montrent une déviation du corps vers l'avant lors de la tâche d'imagination alors

qu'il dévie vers l'arrière lors de la remémoration. Cependant, ces résultats n'ont pas été répliqués par Wilkie, Raw, Mushtaq, Rossiter, Culmer et Mon-Williams (2016). Ces auteurs soulignent que la mesure posturale de Miles et collaborateurs (2009) consiste seulement en un capteur positionné au niveau du genou, et que, dans le maintien postural, lorsque les genoux avancent, la tête a tendance à effectuer le mouvement inverse pour maintenir le corps à la verticale. Ainsi, les résultats précédents étaient peut-être très dépendants de la mesure choisie, et ne refléteraient donc pas un mouvement global du corps vers l'avant ou vers l'arrière. Ainsi, Stins, Habets, Jongeling et Cañal-Bruland (2016) mesurent le centre de pression sous les pieds pour rendre compte d'un déplacement du centre de masse et donc du corps dans son ensemble plutôt que seulement de l'avancement du genou. De plus, ils ont essayé de poursuivre le raisonnement dans le sens suggéré par Miles et collaborateurs (2010) en manipulant l'éloignement temporel de l'événement à rappeler ou à imaginer. Aucun effet de la tâche de remémoration ou de projection n'est mesuré sur la posture.

Les expériences s'intéressant à l'incarnation d'une tâche cognitive font majoritairement des hypothèses mettant en correspondance directe la modification posturale avec la demande de la tâche. Par exemple, pencher en avant quand la tâche demande une projection dans le futur, ou mesurer des modifications posturales uniquement quand le mouvement imaginé implique les pieds (en opposition à l'implication des bras). Rien dans les théories d'incarnation ne laisse supposer cette relation directe, de type miroir entre la cognition et la posture. Dans le cas de l'imagerie motrice, son impact sur la posture pouvait être envisagé comme une adaptation préalable au mouvement réel (préparé par l'imagerie) et donc d'une utilité fonctionnelle pour le maintien de la posture elle-même. L'ancrage de tâches motrices dans le corps est une première étape à la conceptualisation de la cognition comme incarnée ; mais envisager un ancrage de tâches n'ayant pas de composante motrice ou qui ne sont pas pensée comme une analogie avec l'espace péri-personnel (e.g., ligne mentale de chiffre) nécessite une conceptualisation de la cognition comme partageant des processus avec le maintien de la posture. Par exemple, s'orienter dans l'environnement actuel pourrait reposer sur les mêmes processus que s'orienter dans un autre contexte spatio-temporel permettant la remémoration. Avec ce raisonnement, il n'est plus question d'une relation miroir entre la forme des modifications posturales et l'analogie utilisée pour expliquer la résolution de la tâche cognitive.

IV- La mémoire comme activité de nature sensori-motrice enracinée dans le corps et située dans un environnement

La mesure posturale pourrait refléter une conséquence du traitement effectué pour réaliser la tâche cognitive sans pour autant impliquer que le contrôle postural joue un rôle pendant la réalisation de cette tâche. Il est alors essentiel de se questionner sur l'ancrage sensori-moteur de la remémoration épisodique. En effet, si le système sensori-moteur est impliqué dans la réalisation de la tâche, l'hypothèse du partage d'un traitement cognitif entre remémoration épisodique et contrôle postural ne pourra plus être seulement sous-tendue par la supposition de la nature artéfactuelle des modifications posturales lors de la remémoration.

Glenberg (1997) propose d'aborder la question de la mémorisation par le biais de son utilité dans l'interaction avec le monde, donc dans la perception et dans l'action. L'intérêt des représentations sensori-motrices est qu'elles correspondent par nature avec le monde extérieur et libèrent du besoin de faire des associations entre des concepts amodaux. Des expériences démontrent une meilleure mémorisation des stimuli qui font l'objet d'une imagerie visuelle ou motrice ce qui démontrerait un lien entre une simulation sensori-motrice et la performance en mémoire (Marre, Huet et Labeye, 2021). Cependant, ces résultats peuvent être interprétés comme un effet de profondeur d'encodage, comme dans le cas de l'augmentation des performances en rappel lorsqu'une action est performée lors de la présentation du stimulus (pour une revue des effets du geste sur la mémorisation ainsi que des explications alternatives à la profondeur d'encodage voir Madan et Singhal, 2012).

A) Preuves expérimentales en faveur d'une nature sensori-motrice de la mémoire

Dans leur expérience, Brouillet et collaborateurs (2014) mettent en évidence la présence de composantes sensori-motrices en mémoire. Ces résultats ne peuvent pas être interprétés comme un encodage plus profond (dû à la multiplicité des traitements effectués sur le stimulus) lors de la présence d'une composante motrice car celle-ci est implicite (le participant ne fait pas de geste) et incidente (activée dans une tâche distractive indépendante de l'encodage). Les participants apprennent tout d'abord une liste de mots (sans consigne d'imagerie motrice). Puis une tâche distractive entraîne l'association en mémoire chez les participants d'une couleur avec le feed-back « oui » et d'une seconde couleur avec le feed-back « non ». Lors de la tâche de reconnaissance effectuée ensuite, les mots présentés de la couleur associée au feed-back « oui »

sont plus susceptibles d'être reconnus comme anciens alors qu'ils sont nouveaux que les mots présentés dans la couleur associée au feed-back « non » ou les mots présentés en noir. L'effet de la couleur de présentation se retrouve également pour les mots anciens en termes de temps de réponse et de taux de bonnes réponses. Les auteurs concluent que la couleur dans laquelle est présenté le mot transmet une information supplémentaire, à savoir la réponse « oui » ou « non », en fonction de l'association créée pendant la tâche distractive. Cette information sensori-motrice participe ensuite au choix de la réponse à la tâche de reconnaissance, autrement dit, la mémorisation de l'association couleur/feed-back ne semble pas être amodale et abstraite, puisque le contenu « oui » ou « non » peut-être réactivé par la couleur (caractéristique sensorielle). Rey, Riou et Versace (2014) montrent de la même manière que le souvenir de la taille n'est pas amodal et abstrait. Dans leur étude, le souvenir de la taille, réactivé par la couleur qui lui a été associée, peut engendrer une illusion perceptive alors que l'illusion est perceptivement absente. Les auteurs utilisent l'illusion d'Ebbinghaus, dans laquelle la perception de la taille de deux cercles est modulée par la taille des cercles qui les entourent ; avec l'illusion que le cercle entouré par de plus petits cercles est plus gros que le même cercle entouré de cercles plus gros. Lors d'une première phase, les cercles périphériques sont associés à une couleur en fonction de leur taille. Dans une seconde phase, les cercles périphériques sont tous perceptivement de la même taille, mais présentés soit dans la couleur associée à la petite taille soit dans la couleur associée à la grande taille. Les résultats montrent que l'illusion d'Ebbinghaus est présente et ce même si elle est perceptuellement absente. La taille, qui est considérée dans le cadre de la théorie de la cognition incarnée, comme une caractéristique sensori-motrice du stimulus, est réactivée en mémoire suite à la présentation de la couleur. Il semblerait alors que le souvenir ne soit pas totalement amodal et abstrait mais qu'il implique des composantes sensori-motrices.

L'association entre une couleur et une autre caractéristique n'est pas le seul paradigme qui a été utilisé pour mettre en évidence une réactivation sensori-motrice pendant la remémoration. Rey, Riou, Muller, Dabic et Versace (2015) mettent en évidence qu'une stimulation auditive réactive des composantes visuelles perceptivement absentes. En effet, lors d'une tâche de catégorisation d'un son (i.e., naturel versus artificiel), les sons présentés en même temps qu'un masque visuel (i.e., information visuelle de bas niveau prétestée pour engendrer une réduction de la visibilité des stimuli qui le précède) sont catégorisés plus lentement que les sons présentés en parallèle d'un stimulus visuel uni. Ces résultats sont imputés à la réactivation de caractéristiques visuelles de l'objet entendu, réactivation qui est rendue plus difficile, voire impossible, en présence du masque visuel. Cette expérience met en

évidence que les connaissances sont multimodales et qu'elles sont ancrées dans le système sensori-moteur dans le sens où leur réactivation a des conséquences similaires à leur présence perceptive (voir aussi Vallet, Brunel et Versace, 2010). Autrement dit, la réactivation de l'image du lion, est non seulement induite par l'écoute de son rugissement, mais partage des structures communes avec la perception visuelle puisque cette réactivation est perturbée par la présence d'un masque visuel, qui ne devrait en rien affecter la réactivation d'un contenu amodal en mémoire. De plus, dans une seconde expérience, grâce à l'apprentissage incident d'une association entre un son et un masque visuel, les auteurs démontrent que le masque est réactivé en mémoire avec des caractéristiques similaires à sa présentation réelle lorsque le son est présenté. En effet, la tâche de catégorisation d'images est plus lente lorsque le son associé au masque visuel est présenté en parallèle de l'image cible comparativement au son contrôle. Ainsi, le son réactive le masque visuel associé qui entre en conflit avec la perception visuelle, ce qui n'est explicable que par l'implication du système sensori-moteur en mémoire, autrement dit, par un partage de structures entre mémoire et perception. Ces résultats sont soutenus par des données en neuro-imagerie, qui mettent en évidence que, lors d'un pairage entre une image et un son à l'apprentissage, la reconnaissance d'un mot présenté visuellement est associée à une activation du cortex auditif, même en l'absence de la stimulation auditive physique (Nyberg, Habib, McIntosh et Tulving, 2000). Ces données peuvent être interprétées comme une implication du système de traitement des informations sensori-motrices pendant le rappel.

Dutriaux et Gyselinck (2016) s'intéressent à la représentation des objets en mémoire et supposent qu'elle est ancrée dans le système sensori-moteur, et ce même si le traitement demandé suite à la présentation des objets ne nécessite pas de simulation de mouvement. Ainsi, les participants doivent apprendre une liste d'objets sur la base d'images soit avec les mains libres (i.e., posée sur la table devant eux) soit dans une position d'interférence, où les mains ne sont pas disponibles pour la simulation de mouvement (i.e., les mains croisées dans le dos). Les résultats montrent que les performances en rappel libre sont moins bonnes lorsque les mains sont croisées dans le dos lors de l'apprentissage, mais seulement pour les objets manipulables. Cela suggère que le concept de l'objet en mémoire, au moins pour les objets manipulables, contient des informations motrices. De plus, l'interférence de la position lors de l'apprentissage va dans le sens d'un partage de ressources entre la mémoire et le système sensori-moteur. Ces résultats sont répliqués avec la présentation de mots et non d'images, ce qui écarte l'interprétation en termes de caractéristiques visuelles des objets. De nouveau, ces résultats ne sont pas explicables par une conceptualisation de la mémoire comme une réactivation de

contenu amodal et abstrait et vont dans le sens d'un rôle fonctionnel du système moteur pour les concepts d'objets manipulables.

B) Quel impact de l'ancrage sensori-moteur dans la conceptualisation de la mémoire ? Le modèle Act-in

Ces travaux ont été intégrés dans une conceptualisation incarnée de la mémoire, qui rend compte de ces réactivations sensori-motrices à la fois en mémoire épisodique mais également lors de notre interaction avec les objets du monde extérieur. Le modèle Act-in (Versace, Vallet, Riou, Lesourd, Labeye et Brunel, 2014), se présente comme une continuité et une extension du modèle multi-traces d'Hintzman. En effet, les traces mnésiques sont présentées comme intégrant de nombreuses composantes qui sont de nature sensorielle. Par exemple, lorsque je me souviens d'une journée à la mer, je me souviens du bruit des vagues (composante auditive), de la chaleur (composante somesthésique), d'être couchée sur la plage (composante proprioceptive), d'une mouette volant au-dessus de la mer (composante visuelle). Bien sûr, des composantes olfactives (e.g., l'odeur du sel) ou émotionnelles (e.g., la joie du début des vacances), et d'autres encore, peuvent s'intégrer dans cet épisode mnésique particulier. La mémoire serait donc un ensemble de traces composées d'éléments sensori-moteurs par nature. Ainsi, la réactivation d'une trace, avec une diffusion d'activation au sein des composants d'un même épisode, permet une intégration des éléments sensori-moteurs qui donne accès au souvenir d'une trace spécifique. Cette diffusion intra-trace de l'activation permettrait la remémoration épisodique. La particularité de ce modèle est qu'il permet également d'expliquer l'accès à des connaissances générales sur le monde à partir du même système, ce qui induit une nature sensori-motrice des concepts en mémoire (comme démontré dans l'expérience de Dutriaux et Gyselinck, 2016). Le mécanisme supposé est la diffusion de l'activation entre les traces (i.e., épisodes) pour une même composante. Ainsi, si je vois une image de chien, toutes les expériences incluant une composante visuelle de chien pourront être activées. En plus de la réactivation inter-traces, une réactivation intra-trace, plus faible, peut être présente et permettre l'accès à d'autres caractéristiques sensorielles de l'objet (e.g., l'image de chien peut activer également le son que fait un chien). Cette conceptualisation de l'accès aux connaissances générales est également congruente avec les études qui présentent une influence de la mémoire sur la perception et avec l'hypothèse d'une continuité entre perception et mémoire. Ce modèle peut donc rendre compte des résultats de Dijkstra et collaborateurs (2007). En effet, si la trace mnésique est envisagée comme intégrant une composante posturale qui peut être réactivée par

la situation présente (en se tenant par exemple dans la même position), alors les traces qui incluent cette position couchée seront plus réactivées que les traces n'intégrant pas de composante posturale ou celle intégrant une position différente. Ainsi, les souvenirs pré-activés par la posture présente sont plus rapidement accessibles que les souvenirs qui ont été vécus dans une position différente (traces qui ne sont pas réactivées).

Étudier la remémoration par le biais de la posture apporterait une preuve expérimentale supplémentaire en faveur de l'incarnation du processus de remémoration et de son ancrage dans la situation présente. Cependant, il ne s'agirait plus de démontrer la présence d'une composante sensori-motrice posturale en mémoire puisque les preuves en faveur de la nature sensori-motrice de la mémoire sont multiples tout comme la présence d'une composante posturale dans l'épisode remémoré, mais de démontrer que le processus spatial utile au maintien de la posture est également mis en jeu lors de la remémoration. La posture devient donc bien une mesure permettant un accès à des indices concernant l'interaction entre l'individu et l'environnement. Il serait donc possible de montrer un impact de la remémoration sur le traitement de l'environnement actuel (mesurable via la posture), ou même d'engendrer des modifications de la remémoration, grâce à la manipulation de la situation posturale actuelle.

Dans le cadre de la théorie de la construction de scènes, le statut incarné de la remémoration n'est pas directement adressé, mais l'idée de similarité entre la perception et la remémoration d'une scène est tout à fait compatible avec les conceptions incarnées de la cognition. De plus, la notion de scènes remémorées sous une perspective à la première personne avec l'environnement spatial jouant un rôle de structure du souvenir permet de supposer que le processus à l'œuvre pendant la remémoration est de nature spatiale et pourrait être le même processus que celui impliqué dans l'orientation de soi dans l'espace à l'œuvre durant le contrôle postural. Comme dans l'expérience de Rey et collaborateurs (2015) qui démontrent que l'imagerie visuelle serait résolue dans les mêmes structures que celles responsables de la perception visuelle, l'hypothèse posée ici suppose que le traitement de l'orientation spatiale impliqué dans le voyage mental dans un contexte spatial différent de celui expérimenté dans le présent (i.e., celui du souvenir) serait effectué grâce au(x) même(s) processus d'orientation dans l'environnement réel qui sont mis en jeu lors du contrôle postural.

V- Conclusion

La variabilité des tâches et des positions utilisées peut être à l'origine des résultats divergents dans la littérature de la double tâche (pour un résumé des effets cognitifs et moteurs voir Balasubramiam et Wing, 2002). Peu d'études ont utilisé la posture comme une mesure dans le but de mieux caractériser une tâche cognitive. En effet, la question a d'abord été de hiérarchiser l'accès aux ressources centrales de traitement de l'information, en définissant quelle tâche a priorité et sous quelles conditions, puis l'intérêt s'est tourné vers la question du partage possible d'un type de traitement cognitif particulier. Le maintien de la posture pouvant être défini comme une tâche spatiale, les paradigmes expérimentaux se sont tournés vers une opposition entre tâche spatiale et tâche verbale. Les résultats concernant l'implication d'un traitement spatial commun à la posture et à la cognition sont encourageants mais doivent faire face au contrôle de nombreuses variables (e.g., implication de la vision, de l'imagerie visuelle, la charge cognitive...)

Le domaine de l'étude de la double tâche posture-cognition est majoritairement orienté vers les applications possibles chez les athlètes de haut niveau (e.g., remédiation à des blessures) ou les personnes âgées (e.g., minimiser le risque de chutes) ce qui peut expliquer l'intérêt pour la question de la priorisation. En comparaison aux études menées chez les personnes âgées ou les patients, un plus faible nombre d'études est disponible chez les jeunes adultes, pour qui la priorisation d'une tâche sur l'autre est plus difficilement mise en évidence. Des situations expérimentales menaçant l'équilibre et des tâches cognitives plus difficiles doivent être combinées pour observer une priorisation et donc la diminution des performances à une des deux tâches. Par exemple Kerr et collaborateurs (1985) utilisent la position de Romberg et mesurent une diminution des performances cognitives chez les jeunes. De la même manière, Barra et collaborateurs (2006) mesurent des pertes d'équilibre chez les jeunes lors de la réalisation d'une tâche spatiale en Romberg (effectuée sur une poutre). Il semble donc plus ardu chez les sujets jeunes de démontrer la nécessité d'une hiérarchisation des traitements dans une situation de double tâche dans des conditions où la tâche cognitive et la tâche posturale sont laissées à un faible niveau de difficulté, proche d'une condition écologique (Woollacott et Shumway-Cook, 2002).

Comme des modifications posturales sont mesurées lors de la comparaison d'une situation de posture seule à une situation de double tâche, la question se tourne alors vers l'interprétation de ces changements posturaux. Mitra (2004) souligne que lorsque l'équilibre n'est pas menacé la réussite de la tâche posturale n'est pas forcément illustrée par une

diminution des oscillations posturales. Ainsi, si la posture est modulée par la présence d'une tâche cognitive, il est possible d'interpréter les modifications posturales non pas comme une dégradation de l'équilibre mais comme une modification dans les stratégies de maintien postural. Par exemple, Melzer, Benjuya et Kaplanski (2001) couplent la mesure de la posture avec la mesure de l'activité de muscles de la jambe chez les personnes jeunes et âgées. L'augmentation des oscillations posturales est liée à une contraction des muscles plus importante qui est interprétée comme une stratégie de rigidification utilisée par les personnes âgées pour pallier au risque de perte d'équilibre. Cette stratégie se retrouve à la fois lors de la manipulation de la stabilité du support sur lequel il faut se tenir debout et lors de l'ajout d'une tâche cognitive.

Ainsi, le processus de maintien de l'équilibre semble être vicariant, tant à la fois lors de modifications sensorielles ou cognitives. En effet, l'intégration des informations sensorielles semble modulée en fonction des informations disponibles dans l'environnement et de leur fiabilité. Par exemple, si le participant a les yeux fermés, il pourra tout de même se maintenir debout sans tomber. L'hypothèse de repondération sensorielle (Peterka et Loughlin, 2004 ; Mahboobin, Loughlin, Atkeson et Redfern, 2009) prédit que pour maintenir l'équilibre, le système associera un poids plus fort aux informations sensorielles disponibles et/ou fiables (i.e., non bruité que ce soit artificiellement ou non, puisque chaque système sensoriel a une précision différente) et diminuera le poids des informations non disponibles ou peu fiables dans la situation présente (exemple de la modification de la stimulation visuelle avec Mahboobin, Loughlin, Redfern et Sparto, 2005 ; ou des informations vestibulaires avec Cenciarini et Peterka, 2006). Cette flexibilité du système va dans le sens d'un changement possible des traitements amenant au maintien de l'équilibre sans pour autant mettre en évidence une différence d'efficacité. En effet, le déséquilibre est défini littérairement par une absence ou une perte d'équilibre. Or, chez les sujets jeunes quand la posture n'est pas menacée en situation expérimentale (i.e., relativement facile à maintenir) le déséquilibre réel, qui peut être indiqué par une chute ou un pas de côté (par exemple dans le cas d'une position sur un pied) est extrêmement rare. La situation de double tâche chez les sujets jeunes et sains pourrait ainsi engendrer des modifications fines du maintien postural qui ne seraient pas liées à un déséquilibre en tant que tel ni à une dégradation de la performance posturale. Van Emmerik et Van Wegen (2002) démontrent même que la variabilité dans le contrôle postural a un aspect fonctionnel. Sachant que le contrôle postural implique de nombreux muscles et la coordination de différents segments, une tâche peut être réalisée grâce à de nombreuses configurations différentes de tous ces éléments. De plus, lors du vieillissement, la variabilité du signal postural

est appauvrie par rapport à celle des participants jeunes (Lipsitz, 2002). La variabilité dans le maintien postural permettrait sa flexibilité importante lors de contraintes inattendues et changeantes qui interviennent dans l'environnement. Cette conception n'a pas seulement une incidence sur les mesures du signal postural et leurs interprétations dans le domaine de la double tâche mais également sur les techniques de rééducation, avec l'idée que l'entraînement à des situations posturales changeantes serait plus bénéfique que l'entraînement à la réduction des oscillations posturales.

Les preuves expérimentales en faveur d'un partage de traitement spécifique entre la posture et la cognition sont peu nombreuses. Cependant, l'hypothèse a rarement été formulée comme l'incarnation d'un processus cognitif par sa résolution grâce à un traitement similaire à celui nécessaire dans le maintien de la posture. La mise en évidence du caractère sensori-moteur de la mémoire et l'utilisation de la posture comme marqueur de l'ancrage d'un processus cognitif dans le corps sont autant de résultats soulevant la question d'un partage de processus possible entre cognition et posture. De plus, le support grandissant en faveur d'une conceptualisation du maintien postural comme flexible et modulable encourage l'utilisation de la mesure posturale comme un indicateur de la relation individu-environnement à un instant donné. Cela incite à des interprétations plus fines qu'une simple dégradation ou amélioration de l'équilibre dans une situation donnée. L'intérêt de la situation de double tâche passe alors de la conceptualisation d'une hiérarchisation des traitements nécessaires dans une situation conceptualisée comme dépassant la limite de la capacité de traitement de l'individu, à la conceptualisation de la modulation des traitements pour s'adapter à la demande de la situation.

Chapitre 3

EXISTE-IL UN LIEN ENTRE CONTROLE POSTURAL ET MEMOIRE EPISODIQUE ?

Le Chapitre 1 nous permet de supposer un processus spatial à l'œuvre lors de la remémoration épisodique, et le Chapitre 2 suggère que la posture est un indicateur de la relation individu-environnement à un moment donné, avec un prisme spatial (gestion de l'orientation de l'individu dans l'espace) et pourrait être une mesure pertinente de l'implication d'un partage de processus spatial ou incarné dans une tâche cognitive. Ainsi, si la remémoration épisodique se base sur un processus spatial de (re)construction et que la posture est maintenue grâce à des processus spatiaux à l'œuvre lors de l'interaction entre l'individu et son environnement, la réalisation simultanée des deux tâches pourrait engendrer une interférence. Ce chapitre expérimental a pour but de tester cette hypothèse grâce à un paradigme de double tâche. La situation de double tâche a cependant quelques contraintes expérimentales que nous allons aborder dans l'introduction générale de ce chapitre. Ces contraintes sont liées à la mesure posturale mais également aux effets d'interférence, déjà mis en évidence dans la littérature de la double tâche posture-cognition. La littérature dans ce domaine propose des explications qui pourraient constituer des alternatives à l'interférence entre mémoire épisodique et contrôle postural si elle était mesurée. Plusieurs précautions méthodologiques et contrôles expérimentaux ont donc été mis en place sur la base de ces données disponibles dans la littérature. Suite à la présentation des principales précautions expérimentales inhérentes à la situation de double tâche, nous présenterons une première expérience dans laquelle le recours à des processus spatiaux d'orientation et de maintien de l'équilibre est modulé grâce à la position à maintenir pendant la réalisation d'une tâche mnésique. L'effet d'interférence est attendu sur les performances à la tâche de remémoration épisodique. Dans une seconde expérience, la mesure posturale comme indicateur de l'interférence entre mémoire épisodique et maintien postural sera privilégiée.

I- Comment les différents niveaux d'explication d'une interférence contraint méthodologiquement la situation de double tâche posture-cognition

Lors de la mesure d'une interférence entre deux tâches effectuées simultanément, plusieurs niveaux sont possibles pour expliquer cette interférence. Autrement dit, il est possible que la dégradation des performances à l'une ou l'autre tâche soit due, non pas à un partage de processus comme nous cherchons à le mettre en évidence ici, mais à un partage d'informations sensorielles par exemple. Ces différents niveaux d'explication requièrent donc des choix multiples lors du design expérimental afin de cibler au mieux le but poursuivi. Ainsi, nous nous concentrerons ici sur les différents niveaux d'explications possibles, mais également sur leur pertinence dans la situation de double tâche cognition-posture pour conclure sur les contraintes expérimentales nécessaires pour écarter les explications alternatives disponibles dans la littérature.

Wickens (2002) revient sur la théorie des ressources multiples qui propose de prédire la dégradation des performances en fonction de ce que les deux tâches à réaliser simultanément ont en commun. Cette théorie suppose quatre dimensions, divisées en plusieurs catégories, qui seraient associées à des mécanismes physiologiques distincts. Les dimensions sont la modalité de présentation, la nature de l'information visuelle, l'étape de résolution de la tâche et le code (i.e., spatial versus verbal) utile pour réussir la tâche. Lorsque les deux tâches partagent, au sein d'une même dimension, le même type de traitement (e.g. les deux tâches demandent de percevoir une information auditive) elles interfèreraient davantage entre elles que si elles ne partagent pas le même type de traitement au sein de cette dimension (e.g. une tâche repose sur l'acquisition d'informations visuelles alors que l'autre repose sur l'acquisition d'informations auditives). Cette question du niveau de partage des ressources dans une situation de double tâche est également pertinente lorsqu'une des tâches est posturale, car le contact sensoriel avec l'environnement et l'acquisition d'informations sensorielles sont essentiels dans le maintien de l'équilibre et l'orientation dans l'espace.

A) L'importance de l'étape de résolution des deux tâches pendant la mesure de l'interférence

La première dimension sur laquelle une interférence entre deux tâches pourrait être mesurée est l'étape de résolution de la tâche demandée aux participants (i.e., réponse ou

traitement de la stimulation ; Wickens, 2002). Par exemple, deux tâches demandant le même type de réponse (motrice ou orale) pourraient interférer entre elles, quelle que soit la nature du processus impliqué dans la résolution de la tâche. Dans le cas de la double tâche posture-cognition, cette question est d'autant plus importante que le type de réponse demandé peut avoir un impact sur la mesure posturale.

Yardley, Gardner, Leadbetter et Lavie (1998) questionnent la conclusion selon laquelle la dégradation de la posture observée pendant les situations de double tâche serait liée à une interférence au niveau cognitif. Ils soulignent en effet la présence de réponses orales dans de nombreuses tâches cognitives associées à la posture (e.g., répéter une suite de chiffres apprise). Ainsi les auteurs comparent une situation ne nécessitant pas de réponse orale (i.e., ne rien faire et soustraire mentalement sept à un nombre à trois chiffres) à une situation nécessitant une réponse orale (i.e., répéter des chiffres entendus ou soustraire sept à voix haute à partir d'un nombre à trois chiffres). Les résultats montrent que la présence d'une réponse verbale augmente les oscillations posturales alors que l'ajout d'une charge cognitive, ici compter, ne génère pas de modification posturale. Les auteurs supposent que la modulation des oscillations posturales lors d'une articulation de la réponse pourrait être due à la planification du mouvement (également impliqué dans la gestion de l'équilibre) mais également à la respiration. Dault, Yardley et Frank (2003) proposent alors d'ajouter une condition de mouvements de la mâchoire sans tâche cognitive et sans production de mots (i.e., seulement en ouvrant et fermant la bouche). Les auteurs répliquent l'effet de l'articulation (i.e., production de mots) mais mettent également en lumière l'effet de l'ajout d'une tâche cognitive, indépendamment de la présence d'une réponse orale, sur la posture. Cependant, les résultats ne mettent en évidence aucun effet de la condition de planification de mouvement de la bouche sur la posture ce qui argumente en faveur d'une interférence liée à la respiration. De plus, lorsque l'impact de la respiration est directement étudié, il semble qu'elle ait un impact sur les oscillations posturales (Jeong, 1991 ; Bouisset et Duchêne, 1994). Ces résultats considérés ensemble suggèrent qu'il est nécessaire de contrôler pour la présence d'articulation (i.e., réponses à voix haute), lors de la comparaison de différentes tâches.

B) L'importance de la modalité de présentation des stimuli

La seconde dimension est celle de la modalité de présentation des stimuli. L'idée est que s'il est possible de diviser l'attention entre deux modalités sensorielles sans coût, en revanche, le partage du temps de traitement entre deux informations présentées dans la même

modalité engendre nécessairement une diminution des performances. Selon Wickens (2002), l'interférence peut se situer ici soit au niveau périphérique avec un risque de masquage ou de confusions des stimuli soit au niveau central avec un partage de réseaux.

Au-delà du problème lié à la compétition de traitement dans une modalité, le contact sensoriel qu'à l'individu avec son environnement peut moduler les indicateurs posturaux. La présentation visuelle des stimuli pose notamment deux problèmes. Le premier est la question de l'ancrage de la posture grâce au mot présenté (comme s'il servait de croix de fixation) et le second concerne l'impact des modifications de cet ancrage (lorsque le stimulus change, sans pour autant se déplacer). Par exemple, Laurens, Awai, Bockisch, Hegemann, van Hedel, Dietz et Straumann (2009) démontrent que suivre un point des yeux est plus déstabilisant quand aucun environnement visuel fixe n'est disponible en arrière-plan par rapport à une situation où cet environnement fixe est présent. Les mouvements oculaires pourraient donc être à l'origine des modulations posturales en situation de double tâche (pour un effet des mouvements oculaires sur les oscillations posturales voir Rey, Lê, Bertin et Kapoula, 2008).

Comme développé au Chapitre 2, la vision est une information sensorielle très utile pour le maintien de l'équilibre et son absence module les oscillations posturales. Il est alors nécessaire de contrôler l'environnement visuel face auquel le participant maintient sa posture. Cet environnement visuel prodigue un cadre de référence au maintien postural et peut donc moduler l'équilibre. Isableu, Ohlmann, Crémieux et Amblard (1997) montrent que face à un cadre incliné sur la droite ou la gauche, la posture dévient dans le sens de l'inclinaison du cadre visuel, ce qui suggère qu'il est utilisé comme référence posturale et que la vision joue un rôle prépondérant dans la définition de ce cadre de référence. Cette question est d'autant plus importante en situation de double tâche que Riley, Mitra, Saunders, Kiefer et Wallot (2011) suggèrent que la posture n'est pas la seule tâche reposant sur un cadre de référence (i.e., le contrôle de l'équilibre se fait grâce au codage de la verticale qui se fait en fonction des informations vestibulaires mais également des informations visuelles statiques). En effet, la localisation d'un objet se fait forcément en référence à un cadre, un référentiel (e.g., allocentré, égocentré, référentiel terrestre...). Il est alors possible de supposer que l'interférence mesurée lors de la réalisation simultanée d'une tâche cognitive et du maintien de la posture pourrait être due à la disparité des cadres de références entre ces deux tâches. Dans cette optique, Riley et collaborateurs (2011) présentent visuellement des points dans un cadre pendant le maintien d'une position debout. Le participant doit retenir l'emplacement des points pour juger si un point était présent aux divers emplacements proposés ensuite. Les auteurs font l'hypothèse que la position des points sera codée par rapport au cadre (i.e., référentiel allocentré) alors que la

posture est maintenue grâce au référentiel gravitaire. Une fois les positions des points apprises, les auteurs manipulent la disponibilité du cadre de référence. Soit les participants gardent les yeux ouverts avec le cadre sous les yeux, soit ils ferment les yeux et ils doivent donc maintenir un cadre de référence différent de celui nécessaire au maintien de la posture. Si l'interférence est due à un partage de ressources, les deux conditions devraient mener au même résultat. Si au contraire la disparité des cadres de référence explique l'interférence, celle-ci ne devrait se mesurer que dans la condition yeux fermés. Les résultats soutiennent cette dernière hypothèse. Il faut cependant noter que le maintien de l'équilibre les yeux fermés peut être considéré comme plus difficile que le maintien de cette même position les yeux ouverts, ce qui constitue une explication alternative à celle du cadre de référence. Fraizer et Mitra (2007) palie à ce problème grâce à l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle positionnée sur la tête du participant pour présenter une stimulation visuelle en trois dimensions. Dans la condition où la posture et la tâche cognitive partagent le même cadre de référence, le stimulus visuel est fixe, et les mouvements de la tête du participant génèrent les changements de points de vue attendus. Au contraire lorsque le cadre de référence de la tâche cognitive n'est pas aligné au référentiel terrestre, le point de vue de l'individu ne change jamais, autrement dit, les mouvements de sa tête sont accompagnés des mêmes mouvements de la part de la stimulation visuelle et l'environnement visuel reste donc aligné avec le regard du participant (i.e., asservissement visuel). La tâche utilisée par Fraizer et Mitra (2007) est une tâche de recherche visuelle de lettres. Les résultats montrent une dégradation de la posture lors de la non-coïncidence des deux cadres de références (postural et cognitif) et un effet sur les performances à la tâche cognitive. Cependant, dans cette condition expérimentale, la stimulation visuelle n'apporte aucune information sur le contrôle postural et peut donc être considérée au même titre que la résolution de la tâche les yeux fermés dans l'expérience précédente. Ainsi, dans une seconde expérience, la moitié des items partagent le référentiel de la posture et l'autre moitié non. Les effets d'interférence du double référentiel sur la tâche cognitive disparaissent, mais les effets de la disparité de cadres de référence sur le contrôle postural restent significatifs. Les auteurs concluent donc que la manipulation simultanée de deux cadres de référence différents pour les deux tâches a un coût.

Dans le cadre d'un paradigme destiné à mettre en évidence une interférence au niveau des processus, la présentation écrite des items pose alors la question de la création d'un cadre de référence visuel changeant. En dehors même des effets posturaux, un effet de congruence entre l'apprentissage et le rappel pour la tâche de mémoire de source doit être évité. En effet, si

les mots sont présentés à l'écrit lors de l'encodage, les présenter à l'écrit lors de la remémoration engendrerait un effet de congruence induisant une diminution des temps de réponse (i.e., fluence perceptive), qui ne peut être présent que lors d'une tâche de mémoire épisodique et ne peut donc être présent dans la tâche mnésique contrôle. Ces arguments pointent alors vers la nécessité d'une présentation auditive des stimuli pour les tâches mnésiques.

Cependant si le contact visuel avec l'environnement a un impact sur la posture comme nous venons de le souligner, d'autres informations sensorielles présentes dans l'environnement, par exemple de nature auditive, pourraient moduler le contrôle postural. Des études démontrent un effet de la présence d'informations auditives dans l'environnement sur les oscillations posturales dans le sens d'une augmentation de la stabilité (pour une revue des effets du contexte auditif voir Lubetzky, Gospodarek, Arie, Kelly, Roginska, Cosetti, 2020). Par exemple, Gandemer, Parseihian, Kronland-Martinet et Bourdin (2017) mettent en évidence une diminution des oscillations posturales lors de la présence de stimulations auditives fixes dans l'environnement. Les auteurs supposent que ces informations auditives participent aussi à l'orientation de l'individu dans l'espace en prodiguant des points de repère dans l'environnement. Cette diminution des oscillations posturales lors d'une stimulation auditive fixe est plus faible que le gain en équilibration mesuré lors de la présence d'informations visuelles fixes dans l'environnement (Zhong et Yost, 2013). L'utilisation d'un casque pour diffuser les stimuli permet de limiter l'exposition du participant aux bruits alentour et de présenter le son de manière binaurale pour éviter toute sensation d'un son en mouvement, ou la création d'un point de repère fixe dans l'environnement.

Au-delà des précautions méthodologiques que les différents effets reportés précédemment imposent, ces effets constituent autant d'arguments qui démontrent que la posture est située dans un environnement, qu'elle s'ancre dans un contexte. Elle est alors un reflet de l'interaction entre un individu et son environnement. Il est donc nécessaire de contrôler le contexte dans lequel la posture est mesurée et de veiller à ce que la disparité des stimulations sensorielles nécessaire pour la réalisation des tâches cognitives ne puisse pas expliquer les modulations posturales mesurées. Lors d'une hypothèse concernant un partage de processus pour la réalisation de la tâche cognitive et le maintien de l'équilibre, il est intéressant de construire une tâche cognitive contrôle, similaire au niveau des caractéristiques sensorielles des stimulations présentées, mais qui n'implique pas le processus supposé à l'origine de l'interférence.

C) La localisation de la stimulation dans le champ visuel

La vision pourrait cependant constituer une exception à l'argumentation précédente si l'on dissocie le caractère focal ou périphérique de l'information visuelle présentée. L'information focale et ambiante sont traitées par des réseaux cérébraux distincts et sont de natures différentes (i.e., détails versus détection du mouvement), ce qui engendrerait la possibilité d'un traitement en parallèle (Wickens, 2002). Un poids différent de ces deux types d'informations sur le maintien de l'équilibre a été mis en évidence, avec une prépondérance des informations périphériques pour la stabilisation posturale (Berencsi, Ishihara et Imanaka, 2005). En effet, un point de fixation central est moins bénéfique à la stabilisation posturale qu'un pattern de points présenté sur une large partie du champ visuel (Laurens et collaborateurs, 2009). Dans les expériences qui suivent, la mise en place d'une grille face au participant permet de maintenir constant l'environnement visuel, tout en permettant qu'il soit utile au maintien de la posture (en prodiguant des informations de verticalité et un flux visuel lors des oscillations posturales). De plus, une grille procure une fixation adaptée à la taille du participant, car chaque individu trouve une intersection à fixer à la hauteur de son regard pour que sa tête reste droite et alignée à la verticale. Cette information sensorielle sera utilisée pour maintenir l'équilibre mais n'interférera pas avec l'acquisition des stimuli de la tâche cognitive qui seront présentés auditivement.

D) Le partage d'un code de résolution entre les tâches

La dernière dimension pouvant provoquer une interférence est celle du code, spatial ou verbal, grâce auquel la tâche peut être résolue. Cette dimension supposée par Wickens (2002) nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de notre hypothèse de partage de processus. Le but des expériences de double tâche présentées dans cette thèse est de mettre en évidence que la posture et la remémoration épisodique se basent toutes deux sur un processus spatial d'orientation de son corps dans l'espace. Wickens (2002) lie cependant la nature du processus de résolution de la tâche avec la nature de la réponse demandée. Il est donc supposé que les réponses manuelles soient plutôt de nature spatiale (e.g., suivre avec une souris, bouton réponse droite-gauche) alors que les réponses à voix haute sont plutôt de nature verbale. Il est alors plus facile de réaliser deux tâches simultanément avec des modalités de réponses différentes. Dans nos expériences, la posture est une tâche demandant une réponse motrice alors que les tâches mnésiques demanderont une réponse verbale. Cette configuration des réponses permet donc d'exclure une explication de l'interférence au niveau de la modalité de réponse. Ainsi, la nature

verbale de la réponse demandée pour la tâche de remémoration épisodique ne pourrait pas interférer avec la nature spatiale du processus de résolution. Même si la tâche contrôle était considérée de nature verbale, l'interférence code de résolution/réponse (tous deux de nature verbale) supposée par la théorie des ressources multiples ne serait pas en faveur de l'interaction attendue. En effet, l'interférence est supposée uniquement lors de la réalisation de la tâche de remémoration épisodique (considérée comme une tâche spatiale).

La nature du processus de résolution de la tâche a également un impact sur la posture, dans le sens où les tâches spatiales ont un effet différent des tâches non spatiales sur les indicateurs posturaux. Comme développé au Chapitre 2, ces effets sont variables en fonction d'autres paramètres pas toujours contrôlés de manière suffisante (e.g., difficulté des tâches, stratégie de résolution alternative, comparaison à la posture seule ou à une tâche contrôle ...). Tous les effets abordés jusqu'ici dans ce chapitre démontrent que la posture seule n'est peut-être pas le meilleur point de comparaison pour tester notre hypothèse de partage de processus, car il faut exclure les explications en termes de différences de contact perceptif avec l'environnement (i.e., informations visuelles et auditives disponibles), de partage de ressources attentionnelles (i.e., présent en double tâche mais absent en simple tâche), de cadre de référence (i.e., gravitaire pour le maintien postural mais pas pour la résolution de la tâche cognitive) et de présence d'articulation lors de la réponse à la tâche cognitive. La tâche de mémoire épisodique supposée de nature spatiale doit donc être comparée à une tâche de mémoire qui ne nécessite pas de processus spatial pour écarter l'hypothèse d'un effet mnésique global. Les autres paramètres (e.g., stimulation sensorielle, charge cognitive, etc.) doivent être équivalents entre les deux conditions expérimentales pour exclure les explications alternatives présentées jusqu'ici.

E) Difficultés d'interprétation des données en situation de double tâche : question de la condition de référence et des consignes

Fraizer et Mitra (2008) proposent une revue des difficultés liées à l'interprétation des données des expériences en double tâche et suggèrent même que les disparités des méthodologies expérimentales pourraient expliquer les résultats contradictoires présents dans la littérature. Les auteurs soulignent le problème de la condition à laquelle est comparée la situation de double tâche en insistant sur le fait que la posture seule n'est pas une situation sans tâche cognitive mais plutôt une situation dans laquelle le participant fait sans doute quelque chose, qui ne peut être ni mesuré ni contrôlé. La question de la disparité de difficulté et de

charge cognitive entre les deux situations qui sont comparées pour estimer l'interférence se pose alors. Les auteurs suggèrent donc de comparer des situations dans lesquelles la charge mentale associée à la tâche cognitive peut être appréhendée notamment grâce aux performances. Dans cette question de la référence à laquelle comparer la situation de double tâche pour estimer l'interférence, les auteurs soulignent également l'impact que peut avoir une réponse, notamment motrice, présente dans la situation de double tâche mais absente en posture seule. Pour pallier ce problème de variable confondue, les auteurs proposent soit de différer la réponse après la mesure posturale soit de demander le même type de mouvement nécessaire à la réponse sans la charge cognitive associée à la tâche.

Fraizer et Mitra (2008) identifient également l'effet de la focalisation de l'attention comme modérateur du contrôle postural. Cette focalisation de l'attention peut être due à la situation expérimentale (e.g., la présence d'une deuxième tâche éloigne l'attention du contrôle postural) ou aux consignes données aux participants en termes de priorisation d'une tâche sur l'autre ou au contraire de l'importance de réussir les deux tâches le mieux possible. Lorsque la posture est mesurée en parallèle de la réalisation d'une tâche cognitive, la consigne donnée aux participants en termes de gestion posturale a un impact sur les oscillations mesurées. Par exemple, Mitra et Fraizer (2004) comparent deux situations de double tâche posture-cognition. Dans la première condition, les participants ont pour consignes de se tenir debout de manière naturelle et dans l'autre de minimiser leurs oscillations posturales en se tenant le plus immobile possible. Les résultats montrent que les individus sont capables de diminuer leurs oscillations posturales lorsqu'ils ont pour consignes de le faire. Zok, Mazzà et Cappozzo (2008) mettent également en évidence cet effet de consignes (i.e., immobile versus naturel) sur les indicateurs posturaux chez de jeunes adultes sains. Cette diminution des oscillations en situation de double tâche peut être attribuée aux consignes, mais elle est parfois observée lorsqu'aucune consigne ne demande explicitement la minimisation des oscillations posturales. Ainsi, une hypothèse en termes de focus attentionnel voit le jour. Swan, Otani, Loubert, Sheffert et Dunbar (2004) montrent en effet que la présence d'une tâche cognitive en parallèle du maintien postural peut augmenter la stabilité posturale (en comparaison à une situation de simple tâche posturale) et non pas provoquer une interférence comme le prédit la théorie de partage des ressources attentionnelles. Les auteurs supposent que cet effet bénéfique de la présence d'une deuxième tâche serait dû au déplacement du focus attentionnel de la tâche posturale vers la tâche cognitive. Plusieurs indices appuient cette hypothèse. Les personnes âgées sont plus sensibles à cet effet, et il est également mis en évidence lorsque le maintien postural est plus difficile. Le fait qu'une situation posturale complexe (ou qu'une personne ayant plus de difficulté à

maintenir son équilibre) bénéficie d'un retrait de l'attention laisse supposer qu'une automatisation du contrôle postural serait permise dans cette condition. La présence d'une tâche cognitive n'est pas le seul facteur à influencer la stabilité posturale. Lajoie, Richer, Jehu et Tran (2016) mettent en évidence un effet de l'aspect continu versus discret de la tâche cognitive sur la mesure posturale. Les résultats montrent que la tâche continue (e.g., compter de trois en trois) génère une plus grande stabilité qu'une tâche discontinue (e.g., comparaison ponctuelle de deux stimuli).

Desrochers, Richer et Lajoie (2017) mettent en évidence une modulation des oscillations posturales pendant la réalisation d'une tâche cognitive, quelle qu'en soit la nature. Les résultats montrent que les oscillations posturales sont plus irrégulières lors de la réalisation de la tâche cognitive. Cette irrégularité du signal postural serait un indicateur de la gestion automatique de la posture. Cette automatisation du contrôle postural en situation de double tâche a été largement étudiée (e.g., Vuillerme et Nafati, 2005 ; Rhéa, Diekfuss, Fairbrother et Raisbaeck, 2019). Ces résultats sont répliqués avec une tâche supraposturale de nature motrice, avec une focalisation de l'attention soit sur le geste (i.e., interne) soit sur le résultat du geste (i.e., externe) (McNevin et Wulf, 2002). Le simple fait d'ajouter une tâche cognitive en parallèle de la tâche posturale semble écarter l'attention du maintien de l'équilibre et permet sa réalisation grâce à une stratégie plus automatique. Cet effet met en évidence les limites de la comparaison d'une situation de double tâche posture-cognition à une situation de simple tâche posturale. Les modifications posturales pourraient alors être dues à un focus attentionnel externe et non à un partage de processus entre maintien de l'équilibre et remémoration. L'importance du facteur de continuité de la tâche cognitive est également répliquée contrôlant pour le facteur de direction de l'attention (Richer, Polskaia et Lajoie, 2017). Ces données soulignent la nécessité de contrôler le déroulement de la tâche cognitive. Si celle-ci est présentée sous forme d'essais successifs, la tâche contrôle doit également être présentée sous cette forme. Les consignes doivent également être standardisées car les participants semblent être capables de diminuer leurs oscillations posturales si la consigne le spécifie explicitement. Bonnet (2016) discute des avantages et inconvénients liés à la consigne de limitation des oscillations posturales pendant la mesure. Bien que la demande explicite de minimisation des oscillations permette une diminution de la variabilité posturale, l'auteur suppose que cette gestion posturale n'est pas naturelle et ne devrait être utilisée que pour étudier la gestion volontaire et consciente de la posture.

Plus spécifiquement dans le cadre de notre hypothèse, la comparaison d'une situation de double tâche posture-remémoration épisodique avec une situation de simple tâche pourrait engendrer une explication en termes d'imagerie visuelle et non plus en termes de processus spatial. En effet, l'imagerie visuelle semble jouer un rôle dans la remémoration épisodique, plus précisément sur les caractéristiques de l'événement rappelé. D'Argembeau et Van der Linden (2006) ont montré que les individus avec une forte capacité d'imagerie visuelle expérimentent un rappel plus riche en termes de détails visuels. Leurs souvenirs sont également plus détaillés sur les autres modalités sensorielles avec une meilleure représentation du contexte temporel. La capacité d'imagerie visuelle a aussi une plus-value lors de l'imagination d'événements futurs. La théorie de la construction de scènes engendre aussi l'hypothèse d'une forte implication de la modalité visuelle dans la remémoration épisodique. Il faut alors se questionner sur l'impact possible de cette composante d'imagerie visuelle sur le contrôle postural. Si l'imagerie visuelle a un impact sur la mesure de la posture, un contrôle par la présence d'imagerie visuelle dans la tâche mnésique contrôle sera nécessaire. Cette précaution méthodologique permettra d'écarter une explication en termes d'imagerie mentale en faveur d'une explication en termes de partage de processus spatiaux.

Les études qui se sont intéressées à l'effet de l'imagerie mentale sur le contrôle postural l'ont souvent étudiée sous le prisme de l'imagerie motrice, avec l'hypothèse d'une préparation physiologique engendrée par la simulation mentale du mouvement. Cette perspective est intéressante du point de vue de la cognition incarnée, avec l'idée d'un recouvrement du réseau recruté pour l'imagerie motrice et du réseau impliqué dans le mouvement réel. L'imagerie visuelle d'objets est une tâche qui n'a pas été, à notre connaissance, étudiée dans une situation de double tâche posture-cognition. Cependant, l'imagerie visuelle d'un mouvement effectué par autrui a été comparée à une imagerie motrice (i.e., l'individu simule le mouvement en imaginant ce qu'il devrait faire mais également ce qu'il ressentirait en le faisant sans l'effectuer réellement). L'imagerie d'un mouvement effectué par une tierce personne est traitée dans cette littérature comme une tâche d'imagerie visuelle. Comme abordé dans le Chapitre 2, l'implication de l'imagerie visuelle (dans le cadre d'une tâche spatiale) pourrait avoir un impact sur le contrôle postural de par la forte implication de la vision dans le maintien de l'équilibre. Grangeon, Guillot et Collet (2011) font l'hypothèse que l'imagerie motrice devrait impacter le contrôle postural dans le sens d'une diminution des oscillations posturales plus fortement que la tâche d'imagerie visuelle car, lors de mouvements volontaires, la posture est régulée par anticipation des modifications posturales engendrées par le mouvement réel. Les résultats montrent un effet des deux types d'imagerie (i.e., visuelle ou motrice) sur la posture, avec une

plus grande diminution des oscillations en condition visuelle. Les auteurs soulignent cependant l'importance de la vision dans la régulation de certains mouvements (e.g., mouvements de préhension fins) par rapport à d'autres où la vision est moins centrale dans leur réalisation (e.g., mouvement des pieds), ce qui pourrait induire des effets d'imagerie visuelle dans une condition supposée purement motrice.

En résumé, l'imagerie visuelle semble être un facteur important dans la remémoration épisodique et peut être à l'origine de modulations posturales. Ainsi, il est nécessaire de comparer la tâche de remémoration à une tâche mnésique nécessitant une composante d'imagerie visuelle mais qui ne soit pas de nature spatiale ni scénique. L'imagerie d'objets isolés, ne nécessitant ni processus spatial ni intégration des objets dans une scène spatialement cohérente, apparaît alors être une bonne condition contrôle.

F) Choix des tâches mnésiques et de l'environnement sensoriel de la situation de double-tâche

Nous faisons l'hypothèse que l'interférence se situe au niveau des processus de résolution de la tâche et non pas au niveau de la réponse, de la modalité de présentation ou du stade de résolution de la tâche. Ainsi, une tâche contrôle impliquant le même type de réponse (i.e., un réponse à voix haute, choix parmi trois possibles), la même modalité de présentation (i.e., auditive) et le même déroulement pour un essai (i.e., perception du stimulus auditif, choix de la réponse, réponse orale) que la tâche de remémoration épisodique est indispensable pour être sûr que seul le processus de choix de la réponse (i.e., processus de résolution de la tâche, supposé spatial pour la mémoire épisodique) diffère entre nos deux tâches mnésiques. Ainsi, si une interférence est mesurée, elle devrait être spécifique à la remémoration épisodique et ne pourra pas être expliquée par une compétition des ressources de capture sensorielle ou de modalité de réponse.

Pour résumer, l'environnement visuel (i.e., une grille occupant une grande partie du champ visuel) et auditif (i.e., port d'un casque) du participant doit être contrôlé. Les stimuli des tâches cognitives ne doivent pas interférer au niveau périphérique avec les informations sensorielles nécessaires au maintien de l'équilibre (i.e., présentation auditive des stimuli). Pour écarter une interprétation en termes d'effet mnésique global, la tâche de remémoration épisodique doit être comparée à une tâche mnésique qui n'implique pas ce processus spatial de construction de scènes. Le choix se porte alors sur une tâche de mémoire sémantique. La tâche de mémoire épisodique implique une composante d'imagerie visuelle qui doit être également

présente dans la tâche sémantique, ce qui porte le choix vers une tâche de comparaison d'objet dont les critères devront engendrer une imagerie mentale visuelle des objets pour pouvoir répondre. Lorsque ces deux tâches seront comparées, seule la présence d'un processus spatial différera. L'association de ces deux tâches permet même la prise en compte d'une situation de posture seule. En effet, car les différences observées entre simple et double tâches qui seront spécifiques à la remémoration épisodique (i.e., ne s'observeront pas dans l'opposition de la simple tâche à la double posture-tâche sémantique) peuvent également être des indices sur l'interférence spatiale qu'aurait la remémoration sur la posture. En effet, la charge cognitive, la présence d'articulation, les consignes, etc. seront équivalentes en situation de double tâche posture-mémoire sémantique.

Une limite liée à cette théorie des ressources multiples est l'hypothèse d'indépendance des traitements entre deux catégories d'une même dimension. Par exemple, il faut supposer que le traitement d'une stimulation auditive peut se faire indépendamment du traitement d'une stimulation visuelle. Bien sûr, il faut également supposer une limite dans la capacité de traitement d'un individu (dans un temps donné) pour faire l'hypothèse d'une interférence. Il n'est cependant pas nécessaire de revenir à des théories modélisant l'attention de manière séquentielle (e.g., *bottleneck theory*, supposant que les stimulations sont obligatoirement traitées les unes après les autres). La caractéristique continue de la mesure posturale est un avantage car, comme le signal est recueilli tout au long de la double tâche, il contiendra les marqueurs des modifications engendrées par la tâche cognitive, que ces modifications soient éphémères ou persistantes. Autrement dit, la posture est une tâche qui nécessite constamment des processus de maintien de l'équilibre et des corrections (automatiques ou contrôlées). Le contrôle postural peut donc difficilement être séquentialisé avec une autre tâche, mais s'il l'est, les marqueurs posturaux devraient en garder une trace. En effet, l'interférence est mesurée tout au long de la situation de double tâche posture cognition, ce qui n'est pas possible dans une situation de double tâche impliquant deux tâches cognitives.

Les deux expériences qui vont suivre ont pour but de mettre en évidence la présence d'un processus spatial à l'oeuvre lors de la remémoration épisodique. Pour cela, nous avons utilisé un paradigme de double tâche cognition-posture qui a l'avantage d'être écologique. En effet, chaque jour, quelle que soit la position dans laquelle nous nous trouvons, un contrôle de notre posture est effectué en parallèle de nos autres tâches quotidiennes. Par exemple, nous pouvons aisément parler en marchant, planifier notre journée tout en nous levant ou encore se maintenir assis ou debout en applaudissant. Plus spécifiquement pour les expériences qui vont

suivre, la posture est une tâche impliquant des processus spatiaux d'orientation et de gestion de son corps dans l'espace sans faire appel à de la mémorisation explicite. Les études antérieures associant mémoire épisodique et tâche spatiale dans un paradigme de double tâche impliquent toutes la mémorisation d'un pattern d'objets ou d'un environnement pour pouvoir ensuite effectuer des tâches spatiales de pointage d'objets ou de navigation. Il ne s'agit pas ici de défendre le fait que le contrôle postural ne nécessite pas de mémoire ou un certain apprentissage mais que cet aspect n'entre pas en jeu lors de l'expérimentation. En effet, au contraire d'une tâche de pointage où le sujet doit apprendre un arrangement d'objets afin d'en rappeler plus tard la position par rapport à lui ou par rapport à une référence externe, le sujet n'a ici pas de tâche de mémorisation portant sur des aspects d'orientation spatiale. De plus, pour renforcer l'aspect écologique de notre paradigme, nous n'utiliserons, dans ces deux expériences, que des positions faciles à maintenir (e.g., debout les bras le long du corps avec les jambes écartées à la largeur des hanches). Pour finir, le choix de la posture comme tâche spatiale permet de concevoir la remémoration épisodique comme incarnée dans un corps et située dans un environnement. En effet, la posture étant un indicateur de la relation individu-environnement à un moment donné (elle peut être modifiée par le contexte sensoriel), sa modulation par une tâche mnésique peut être interprétée comme une preuve en faveur de l'incarnation du processus de remémoration. En effet, si la mémoire épisodique et la posture ont une influence réciproque nous pouvons commencer à concevoir le voyage mental dans le passé comme reposant sur des processus similaires à ceux mis en jeu lors d'une navigation réelle.

Afin de tester cette hypothèse d'incarnation de la remémoration, deux manipulations opposées sont possibles pour mettre en évidence un partage de processus ou de ressources entre deux tâches : diminuer ou au contraire augmenter la demande du processus d'intérêt pour réaliser une des deux tâches afin d'observer l'effet de cette manipulation sur la performance de l'autre. Nous avons exploré dans l'Expérience 1 la diminution du recours au processus d'orientation spatiale pour le maintien postural afin de le laisser totalement disponible pour la réalisation de la tâche mnésique. Nous avons opposé la réalisation de tâches cognitives en position debout, impliquant un processus d'orientation spatiale et un maintien de l'équilibre, à une position couchée qui ne demande pas de maintien de l'équilibre et peu de processus spatiaux d'orientation. Nous postulons que si le processus spatial est partagé entre la posture et la cognition, il ne pourra pas être utilisé en parallèle par les deux tâches. En effet, la double tâche est définie par McIsaac, Lamberg et Muratori (2015) comme la performance simultanée de deux tâches qui peuvent être réalisées indépendamment, mesurées séparément et qui ont des buts distincts. Ainsi, comme le même processus ne pourrait être utilisé simultanément pour atteindre

deux finalités distinctes, des modifications de stratégies seraient alors indispensables soit pour le rappel soit pour le maintien postural afin d'effectuer les deux tâches en parallèle sans en délaissier une pour se concentrer sur l'autre. Il serait alors possible de forcer la vicariance dans la résolution des deux tâches. Les indicateurs posturaux pourraient alors refléter ce changement de stratégie de maintien de l'équilibre et les performances mnésiques pourraient diminuer dans le cadre d'une remémoration épisodique. Les résultats antérieurs disponibles dans la littérature tendent à montrer que des modifications de performances cognitives sont plus souvent observées lorsque la difficulté de la tâche posturale augmente. Nous avons donc exploré l'impact de l'augmentation de la difficulté de maintien postural grâce à une position debout les yeux fermés. L'Expérience 2 augmente ainsi le challenge lié au maintien postural, sans menacer de manière trop importante l'équilibre.

II- Expérience 1 : Evaluation du partage d'un processus spatial d'orientation entre la mémoire épisodique et le contrôle postural. Comparaison de la position debout et de la position couchée.

A) Raisonnement général et hypothèses

Le premier moyen de mettre en évidence un partage de processus entre deux tâches est de libérer ce processus pour qu'il soit pleinement disponible pour l'autre tâche. Pour minimiser l'implication du processus spatial dans le maintien de la posture, nous avons choisi d'utiliser la position couchée qui ne nécessite pas de maintien de l'équilibre. À notre connaissance, l'impact de la position couchée sur les performances à des tâches cognitives est une question de recherche peu adressée dans la littérature. Quand la position couchée est étudiée, la multiplicité des approches rend difficile l'intégration des résultats dans un modèle commun et ne permet que peu de prédire ce qui serait mesuré lors de l'association de la position couchée à une tâche de mémoire épisodique. Une étude assez ancienne s'intéresse à la mémoire autobiographique. Berdach et Bakan (1967) comparent le rappel de souvenirs en position assise et couchée et mettent en évidence que la position couchée facilite le rappel d'événements vécus dans l'enfance et l'adolescence. Leur paradigme expérimental est mis au point dans le but d'évaluer la pratique clinique et les consignes de rappel ne spécifient donc pas les caractéristiques qui définissent actuellement l'épisodicité du rappel (i.e., accès aux détails contextuels, sensation de revivre...).

En sortant du domaine de la mémoire, les performances cognitives sont généralement meilleures en position assise que couchée chez les sujets sains (e.g., résolution de problèmes, Schulman et Shontz, 1971 ; détection d'odeurs, Lundström, Boyle et Jones-Gotman, 2006). L'hypothèse est que l'état d'alerte (*level of arousal*) est supérieur en position assise par rapport à la position couchée. Par exemple, Muehlhan, Marxen, Landsiedel, Malberg et Zaunseder (2014) mettent en évidence une corrélation entre les temps de réponse en condition couchée à une tâche cognitive (*N-back task*) et la qualité du sommeil sur le dernier mois (mesure auto-rapportée), bien que les performances ne varient pas significativement entre les deux positions. Ces résultats sont soutenus par des données en imagerie qui tendent à montrer une inhibition corticale lorsque le participant est en position couchée qui n'est pas mesurée en position debout (Spironelli, Busenello et Angrilli, 2016). Cette modulation de l'activité cérébrale pourrait expliquer la diminution des performances cognitives et met en évidence une importance de la position dans la mise en place d'un paradigme expérimental. Dans ces études, l'hypothèse n'invoque qu'un effet global, aucun partage de ressources spécifiques n'est supposé entre la cognition et le contrôle postural à l'œuvre pour maintenir une position donnée.

Cependant, les résultats de Peru et Morgant (2006) laissent à penser qu'un partage de ressources pourrait avoir lieu entre le maintien de l'équilibre et une tâche cognitive. Les auteurs s'intéressent à l'effet de la position sur la performance à une tâche de détection de stimuli lumineux (présentés dans le champ visuel droit et/ou gauche) chez des sujets sains et des patients cérébrolésés avec ou sans extinction visuelle. L'extinction visuelle consiste en l'absence de détection d'une stimulation controlatérale (par rapport à la localisation de la lésion) lors de la présentation simultanée d'une stimulation ipsilatérale alors qu'elle est correctement détectée lorsqu'elle est présentée seule. Les résultats montrent que la performance est meilleure en position couchée qu'en position assise pour les patients avec extinction visuelle. Aucune différence entre ces deux positions n'est observée chez les participants sains. Les auteurs supposent qu'en position couchée, le cadre de référence égocentrée est moins déformé par la négligence spatiale visuelle, ce qui améliore la détection des stimulations visuelles dans l'hémichamp visuel controlatéral. Il est également possible de réfléchir en termes de partage de ressources sensorielles, avec la vision qui est à la fois utile pour se maintenir à la verticale et pour détecter les stimulations visuelles utilisées pour la tâche cognitive. La position couchée ne nécessitant aucun maintien de l'équilibre et donc du maintien de son corps à la verticale, le traitement des informations visuelles peut être entièrement dédié à la tâche cognitive de détection de cibles. Pour dissocier l'effet de l'alignement à l'axe gravitaire et le maintien de l'équilibre, il faudrait envisager une condition dans laquelle le participant est assis et

immobilisé, c'est-à-dire placé dans un dispositif qui minimise le maintien de l'équilibre nécessaire au maintien de la position.

D'autres études s'intéressent à la position couchée pour évaluer la comparabilité des expériences comportementales à celles menées en IRMf qui diffèrent en termes de position dans laquelle la tâche cognitive est effectuée. Sun et Harmon-Jones (2020) étudient grâce à l'interférence de Stroop la réduction du conflit cognitif en position couchée. Ils se basent sur des résultats antérieurs suggérant une baisse de la motivation en position couchée et une réduction de la dissonance cognitive. Ils choisissent d'étudier les activations cérébrales lors d'une tâche de Stroop car la position couchée augmente l'activation du système parasympathique (associé au repos et à la digestion), alors que l'interférence dans cette tâche de Stroop augmente l'activation du système sympathique. L'onde N450 est connue pour indiquer le traitement d'un conflit, avec une plus grande amplitude lorsque le conflit est présent (essais incongruents réussis) en comparaison à une situation où le conflit n'est pas présent (essais congruents réussis). L'amplitude de N450 est plus faible sur les essais incongruents en position couchée que sur les essais incongruents en position assise. De plus, les auteurs observent un effet, bien que faible, sur les bonnes réponses en situation incongruente, avec plus d'erreurs en position couchée qu'en position assise. Les activations cérébrales associées à la résolution d'une tâche diffèrent donc entre la position assise et couchée. Muehlan et collaborateurs (2014) soulignent également les précautions à prendre lors de la généralisation des résultats obtenus couché, notamment en imagerie cérébrale, alors que la plupart des activités s'effectuent en position debout ou assise dans la vie quotidienne.

Un autre pan de la littérature s'intéresse à la position couchée comme position non canonique pour adresser des questions de performances des astronautes en absence de gravité, qui est indispensable pour mener à bien des missions dans l'espace. En l'absence du système coûteux permettant de créer une situation de micro-gravité, la position couchée est utilisée avec l'idée que dans l'espace, notre navigation et notre capacité à se repérer dans l'environnement qui nous entoure doit se faire dans les trois dimensions, et pas toujours (voire jamais) debout, avec la tête en haut. Cette question récurrente dans la littérature permet donc d'avoir quelques indices concernant l'impact de la position sur les performances cognitives.

Oman, Shebilske, Richards, Tubré, Beall et Natapoff (2002) rapportent des performances plus faibles en position couchée dans une tâche de rotation mentale d'un pattern d'objets pour les premiers essais, indiquant un apprentissage plus aisé en position assise. Les auteurs insistent cependant sur la petite taille de cet effet. L'avantage de la position assise disparaît rapidement au fil des essais. Un autre indice en faveur d'un impact de la position sur

les performances se lit dans la modification des performances entre deux essais successifs où le changement de posture s'opère. Une diminution des performances a lieu lorsque le participant réalise pour la première fois la tâche en position couchée suite à un bloc assis et lorsque le participant réalise pour la première fois la tâche en position assise suite à un bloc couché. Par rapport aux tâches utilisées dans les expériences précédentes, la tâche de rotation mentale nécessite un processus spatial de localisation de soi dans l'espace par rapport à l'objet ainsi qu'une manipulation mentale de la position de l'objet. La tâche de remémoration épisodique serait, dans le cadre de la théorie de la construction de scènes, plus proche de cette tâche de rotation mentale qui demande un processus spatial lors de sa résolution que des tâches utilisées dans les expériences citées précédemment (e.g., N-back task). Cette modulation de la performance suite à une modification posturale pourrait être un indicateur de vicariance, un indice de la modification des processus utilisés pour réaliser la tâche en fonction de l'environnement.

Francuz (2010) ne réplique pas cet effet de la position sur la performance à une tâche de rotation mentale d'objet en 2D. Cependant, il met en évidence un effet de congruence entre l'axe du corps et l'orientation de l'objet à reconnaître. En effet, les objets sont tournés avec plus de précision lorsque le haut de l'objet est parallèle au haut du corps du participant. Par exemple, lorsque le participant est couché sur le côté droit, il sera plus performant si l'objet est tourné du côté droit que s'il est tourné du côté gauche ou présenté à l'envers ou même s'il est dans sa position canonique. Lors d'une tâche de rotation mentale, aligner l'axe de rotation de l'objet avec l'axe longitudinal du corps est plus avantageux que de l'aligner à la gravité. Ces résultats nous amènent à envisager une importance de la position dans la réalisation d'une tâche cognitive dans le sens où elle définit un cadre spatial de référence.

Dans les paradigmes utilisant la position couchée, la posture n'est que peu conceptualisée comme une seconde tâche effectuée en parallèle de la résolution de la tâche cognitive. Il n'est alors pas question de lui attribuer des processus indispensables à sa réalisation ou des ressources sensorielles qui pourraient interagir avec ceux nécessaires à la résolution de la tâche cognitive. Notre hypothèse, au contraire de celles présentées jusqu'ici, se tourne sur un partage de processus entre maintien de l'équilibre et cognition. Nous avons choisi la position couchée afin de créer une condition dans laquelle la demande d'orientation spatiale dans le contrôle postural est minimale. Les résultats de Marendaz, Stivalet, Barraclough et Walkowiac (1993) peuvent être interprétés en faveur de cette hypothèse. Les auteurs comparent une tâche de recherche visuelle de cibles ayant différentes orientations (i.e., verticales ou inclinées à 18

degrés) en position assise ou couchée. Les résultats montrent que l'asymétrie des temps de réponse classiquement mesurée en position assise est absente en position couchée avec une recherche en parallèle, quelle que soit la nature de la cible. Cet effet pourrait être dû à la libération des processus de traitement visuel, qui ne sont plus nécessaires pour le contrôle postural et qui sont donc disponibles pour la tâche cognitive. Cependant, l'absence d'effet lors de la recherche de cibles non spatiales (i.e., O ou Q) laisse à penser que la nature spatiale de la tâche joue un rôle central dans l'effet observé. Il serait alors possible de supposer que la position couchée recrute moins de processus spatiaux que la position assise, et que ces processus sont laissés libres pour la résolution de la tâche cognitive.

Un second argument en faveur d'une diminution de la demande de maintien postural en position couchée réside dans la hiérarchisation de la difficulté des positions pour les expériences en double tâche posture-cognition. La position assise est souvent utilisée comme condition contrôle, c'est-à-dire que c'est dans cette position que sont mesurées les performances cognitives de référence, qui permettront ensuite de déterminer si les performances ont augmenté ou diminué en fonction de la condition expérimentale (Kerr et collaborateurs, 1985 ; Dault et collaborateurs, 2001 ; Vandervelde et collaborateurs, 2005 ; Swan, Otani et Loubert, 2007). Cette position est opposée à d'autres, supposées plus difficiles à maintenir, comme par exemple la position debout en Romberg ou pieds joints. Lajoie, Tesdale, Bard et Fleury (1993) montrent que la demande attentionnelle associée à la position assise est moins importante que celle nécessaire pour maintenir la position debout ou marcher, qui requièrent une régulation posturale continue. Dans la suite de ce raisonnement, il paraît envisageable de supposer que la position couchée est encore plus facile à maintenir que la position assise. En effet, même en condition assise un certain équilibre postural est nécessaire (Kerr et collaborateurs, 1985). Dans cette première expérience, nous postulons donc une diminution des performances cognitives en position debout comparativement à la position couchée, qui serait plus marquée pour la tâche de remémoration épisodique de par sa composante spatiale. Donc notre hypothèse est fondamentalement une hypothèse d'interaction entre la position dans l'espace et la tâche cognitive.

B) Méthode

1. Participants

Vingt-neuf volontaires ont participé à cette expérience (15 femmes et 14 hommes, \bar{m} âge = 21,1 ans ; ET = 2,02). Les participants étaient de jeunes adultes déclarant ne prendre aucun médicament susceptible de modifier les fonctions cognitives et n'avoir aucune pathologie motrice, passée ou actuelle. Ils avaient tous une vue et une audition normales ou corrigées à la normale. L'expérience a été réalisée en accord avec la déclaration de Helsinki de 1964 et approuvée par le comité éthique de l'université Grenoble Alpes (IRB00010290-2017-10-03-26). Les participants étaient, entre autres, informés de leur droit d'arrêter l'expérience à tout moment sans justification ni conséquences. Les participants signaient un formulaire de consentement libre et éclairé au début de l'expérience et pouvaient poser leurs questions concernant le but et les hypothèses à la fin de celle-ci.

2. Matériel

Tâches mnésiques. Les tâches de mémoire épisodique (i.e., rappel de source) et de mémoire sémantique (i.e., comparaison d'objets) ont été adaptées de l'expérience de Cerles et al. (2015). Cette expérience a mis en évidence une interférence entre la remémoration et une tâche spatiale de pointage, qui n'a pas lieu lorsque la tâche mnésique est de nature sémantique. Ainsi, cette tâche de mémoire de source implique un processus spatial. L'intérêt de l'associer ici à une tâche posturale réside dans un but de démontrer, avec une nouvelle mesure, l'implication d'un processus spatial lors de la remémoration épisodique (i.e., réplication), mais également d'affiner la nature de ce processus. En effet, grâce au paradigme de double tâche posture/rappel de source, il est possible d'évaluer si le processus spatial à l'œuvre pendant la remémoration a des points communs avec le processus spatial d'orientation de son corps dans l'espace, à l'œuvre dans le maintien postural. Pour répondre à cette question, nous allons, dans le même paradigme expérimental, comparer une tâche de mémoire épisodique avec une tâche de mémoire sémantique, en maintenant constant le niveau de difficulté, la composante d'imagerie mentale et le nombre de réponses possibles. La différence majeure entre ces tâches est l'utilisation du processus de construction de scènes, nécessaire dans le rappel de source mais pas dans la comparaison d'objets.

Pour la tâche de mémoire épisodique, trois listes de 17 mots ont été construites (voir Annexe I). Les listes étaient composées de mots de 17 catégories différentes (i.e., oiseau, fruit, légume, sport, ustensile de cuisine...). Les participants devaient apprendre chacune des trois

listes au tout début de l'expérience. Pendant cet apprentissage, les participants étaient assis sur une chaise à une table, dans une salle dédiée à l'apprentissage. La première liste était lue sur une feuille de papier, la seconde était recopiée à la main et les mots de la troisième liste apparaissaient un par un au centre de l'écran d'un ordinateur portable. Chaque liste était présentée 3 fois pendant 2 minutes. Chaque présentation était suivie d'un rappel libre puis d'un rappel indicé. Pour chaque mot non rappelé pendant la minute de rappel libre, l'expérimentateur énonçait la catégorie du mot pour aider au rappel (e.g., « c'était un oiseau » pour indiquer *cigogne*). Cette combinaison de deux rappels suite à des présentations longues et répétées a pour but de maximiser l'apprentissage des mots. La tâche était présentée aux participants comme une tâche de mémoire à court terme mais ces mots servaient ensuite de stimuli à la tâche de mémoire de source. Les participants n'étaient donc pas informés du but réel de l'apprentissage, c'est-à-dire du rappel de source qui débutait environ dix minutes après. Ensuite, pour le rappel de source, qui s'effectuait en parallèle de la mesure posturale dans une autre salle, le participant entendait un mot appris et devait déterminer à quelle liste il appartenait le plus rapidement et le plus correctement possible. Ils devaient répondre oralement « liste » (si le mot appartenait à la liste lue en premier), « copie » (si le mot appartenait à la liste présentée en deuxième qui avait été copiée) ou « écran » (si le mot appartenait à la troisième liste présentée sur ordinateur).

Pour la tâche de mémoire sémantique, 96 mots désignant des objets, des animaux et des plantes étaient présentés par paires. Les participants entendaient successivement deux mots et devaient indiquer sur quelles caractéristiques ils se ressemblent le plus. Trois réponses étaient possibles : la flexibilité (i.e., si les deux mots se réfèrent à quelque chose de rigide ou à quelque chose de souple), la forme (i.e., si les deux mots se réfèrent à quelque chose de rond, de carré, de rectangulaire...) ou le poids (i.e., si les deux mots se réfèrent à deux choses ayant à peu près le même poids). Par exemple, le point commun entre « une roue » et « une pizza » est la forme. En effet, leur poids est très différent et la pizza est malléable alors qu'une roue est rigide, ce qui exclut également la réponse flexibilité (pour connaître les items utilisés en mémoire sémantique ainsi que la réponse associée considérée comme correcte, référez-vous à l'Annexe II).

Lors de la double tâche, les stimuli étaient diffusés auditivement dans un casque grâce à E-prime 2.0 (Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA). Un microphone relié à E-Prime était utilisé pour enregistrer les réponses et mesurer le temps s'écoulant entre la fin de la présentation auditive du stimulus et le début de la réponse verbale du participant.

Tâche posturale. Le participant devait se tenir dans deux positions différentes pendant la réalisation des tâches mnésiques. Dans une condition, le participant était couché sur le dos sur un matelas à dépression et devait regarder droit devant lui, jambes repliées et les bras le long du corps. Dans l'autre condition, le participant se tenait debout sur une plateforme posturale les jambes écartées à la largeur des hanches les bras le long du corps en regardant droit devant lui. Dans les deux cas, une grille était positionnée à environ 80 cm des yeux du participant. La consigne pour le maintien de la position était la même, le participant devait rester détendu, les bras le long du corps et immobile durant la réalisation de la tâche cognitive, c'est-à-dire en évitant les mouvements volontaires (e.g., se gratter, plier les genoux, etc.).

Matériel de mesure posturographique. La posture en position debout a été mesurée grâce à une plateforme équipée de quatre capteurs de force reliés à un ordinateur (une installation similaire a été utilisée par Laboissiere et collaborateurs, 2015). Les déplacements du centre de pression sous les pieds (*center of pressure*, CoP) ont été mesurés sur un plan horizontal en deux dimensions (i.e., selon les axes antéro-postérieur et médio-latéral) avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. Les axes antéro-postérieur (y) et médio-latéral (x) ont été définis de sorte à être respectivement parallèles aux bordures verticales et horizontales de la plateforme. Ces positions successives du CoP qui sont enregistrées constituent le stabilokinésigramme. Lorsqu'un poids de 70 kg est appliqué au centre de la plateforme, l'imprécision moyenne de la mesure du CoP est de moins d'un millimètre. Les participants se tenaient pieds nus sur la plateforme, et le contour de chaque pied était dessiné sur une feuille fixée au centre de la plateforme afin de s'assurer que la position du participant soit la même entre deux mesures successives, et ce même s'il descendait de la plateforme pour s'asseoir ou prendre une pause. L'intérêt de mesurer la posture dans cette expérience est l'idée de pouvoir répliquer les résultats d'au moins une condition expérimentale entre nos expériences. Si nous pouvions recueillir des indices différentiels de gestion de l'équilibre lors de la réalisation de la tâche épisodique et sémantique, cela nous permettrait d'affiner notre paradigme expérimental, en créant des conditions ayant pour but de moduler ces indices différentiels.

3. Procédure

L'expérience se déroulait en deux phases qui avaient lieu dans deux salles différentes. Pour commencer, le participant apprenait les trois listes de mots dans un box expérimental. Il était assis sur une chaise face à une table et réalisait les rappels libres et indicés immédiats pour chacune des trois présentations de chaque liste. Cette phase durait environ 40 minutes. Ensuite,

le participant était guidé vers une seconde salle dans laquelle se trouvait le matériel de mesure de la posture.

Dans cette seconde phase, le participant réalisait la double tâche posture-tâche mnésique. L'expérimentateur présentait tout d'abord les consignes posturales en expliquant au participant quelles seraient les positions à maintenir pendant la suite de l'expérience. Ensuite, les consignes des tâches mnésiques étaient données. Le participant effectuait ensuite deux essais de familiarisation pour la tâche de rappel de source et deux autres pour la tâche de jugement de similarité.

Cette phase en double tâche se divisait en 16 blocs, la moitié était effectuée en position couchée et l'autre moitié en position debout. La moitié des participants commençaient par la position debout et l'autre moitié par la position couchée. Dans les huit blocs réalisés dans une position donnée, la moitié était composée d'essais de rappel de source et l'autre moitié d'essais de jugement de similarité. Un bloc se déroulait toujours de la même manière, seule la nature de la tâche mnésique à réaliser changeait. Le participant entendait tout d'abord un rappel des consignes pour la tâche ainsi que les trois réponses possibles. Il entendait ensuite le premier stimulus et devait répondre le plus rapidement et le plus correctement possible. Le participant donnait sa réponse à voix haute puis une pause de trois secondes s'écoulait avant le début de l'essai suivant avec la présentation auditive du second stimulus. Les blocs se composaient de six essais. Une minute de repos minimum était imposée entre chaque bloc pour que le participant puisse bouger et changer de position. La nature de la tâche mnésique était alternée entre deux blocs, de sorte que deux blocs qui se suivent ne présentent jamais la même tâche. Les stimuli ont été contrebalancés entre les positions.

C) Résultats

Les données issues des performances cognitives ont été analysées grâce à la fonction ANOVA du logiciel Statistica. Les résultats sont considérés comme statistiquement significatifs quand $p < 0,05$.

Le pourcentage de bonnes réponses (voir Figure 2) était supérieur au hasard (33,3%) à la fois pour la tâche sémantique ($\bar{m} = 72,92\%$; $ET = 13,69$; $t(1,28) = 16,77$; $p < 0,05$) et pour la tâche épisodique ($\bar{m} = 88,65\%$; $ET = 8,75$; $t(1,28) = 41,23$; $p < 0,05$). Le pourcentage de bonnes réponses n'était pas supérieur en condition couchée ($\bar{m} = 80,60\%$; $ET = 13,93$) par rapport à la condition debout ($\bar{m} = 80,96\%$; $ET = 13,98$; $F(1,28) = 0,05$; $p = 0,82$). Cependant, la tâche

de rappel de source générant de meilleures performances ($\bar{m} = 88,65\%$; $ET = 8,75$) que la tâche de comparaison d'objets ($\bar{m} = 72,92\%$; $ET = 13,69$; $F(1,28) = 56,95$; $p < 0,05$). Il n'y avait aucun effet d'interaction entre la position et la nature de la tâche mnésique ($F(1,28) = 0,10$; $p = 0,756$).

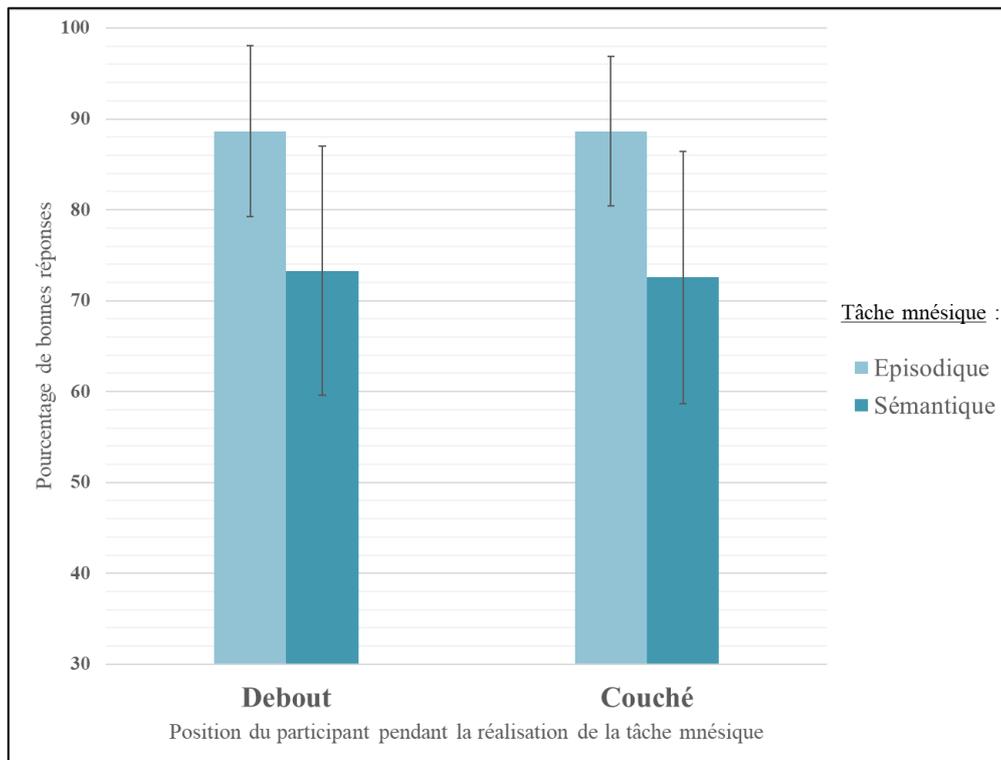


Figure 2: Pourcentage de bonnes réponses en fonction de la position du participant et de la tâche mnésique.

La position du participant indiquée en abscisse est celle maintenue pendant le rappel. L'apprentissage s'effectuait toujours en position assise. Les barres verticales représentent l'écart-type.

Les temps de réponse ne sont pas significativement différents en position couchée ($\bar{m} = 2920,73$ ms ; $ET = 1291,5$) en comparaison à la position debout ($\bar{m} = 2700,95$ ms ; $ET = 892,09$; $F(1,28) = 3,32$; $p = 0,080$). Cependant, les temps de réponse à la tâche épisodique étaient plus courts ($\bar{m} = 2505,25$ ms ; $ET = 746,79$) que les temps de réponse à la tâche sémantique ($\bar{m} = 3116,43$ ms ; $ET = 1319,34$; $F(1,28) = 14,38$; $p < 0,05$). Il n'y avait aucun effet d'interaction entre la position et la nature de la tâche mnésique ($F(1,28) = 0,16$; $p = 0,70$).

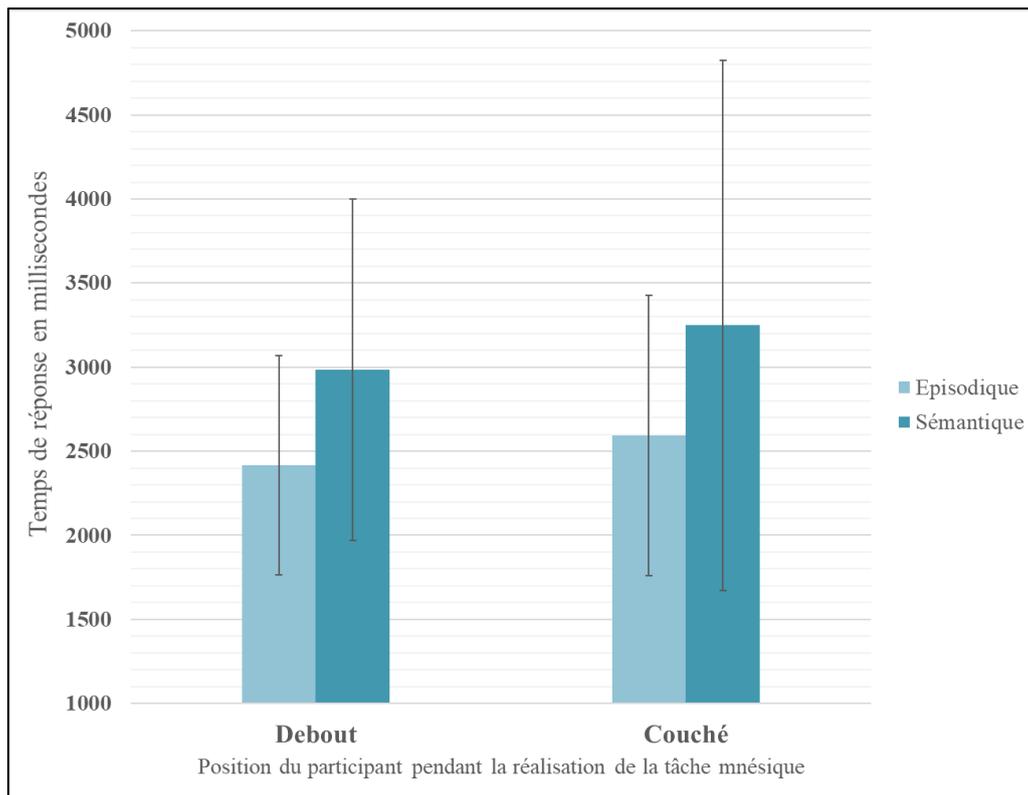


Figure 3: Temps de réponse en millisecondes en fonction de la position du participant et de la tâche mnésique.

La position du participant indiquée en abscisse est celle maintenue pendant le rappel. L'apprentissage s'effectuait toujours en position assise. Les barres verticales représentent l'écart-type.

D) Indicateurs posturaux et analyse posturale exploratoire

Nous nous sommes intéressés à des indicateurs de stabilité posturale : la surface et le range. La surface est l'aire de l'ellipse de confiance recoupant ici 90% du stabilokinésigramme (mm^2). Le range est la distance maximale entre les déplacements droite-gauche sur l'axe médio-latéral ou avant-arrière sur l'axe antéro-postérieur. Selon la littérature (Pietro, Myklebust, Hoffmann, Lovett et Myklebust, 1996), une augmentation de la surface ou du range serait un indicateur d'une instabilité posturale. Le logiciel Matlab a été utilisé pour extraire du stabilokinésigramme les différents indicateurs posturaux pour chaque sujet dans chacune des conditions expérimentales. Ainsi, chaque enregistrement postural de six essais donnait lieu à l'extraction des trois indicateurs. La variable dépendante est donc la moyenne des six blocs pour chaque tâche mnésique. Une ANOVA a été réalisée grâce au logiciel Statistica. Les résultats sont considérés comme statistiquement significatifs quand $p < 0,05$.

Dans cette démarche exploratoire, nous avons donc analysé le signal postural recueilli lorsque le participant se tenait debout, les pieds écartés à la largeur des hanches, les yeux ouverts

et réalisait soit la tâche de mémoire épisodique soit la tâche de mémoire sémantique. Le range médio-latéral (i.e., oscillations gauche-droite) est plus important lors de la réalisation de la tâche sémantique ($\bar{m} = 12,14$ mm ; ET = 5,15) que lors de la tâche épisodique ($\bar{m} = 10,79$ mm ; ET = 4,37 ; $F(1,28) = 7,31$; $p < 0,05$). Le range antéro-postérieur (i.e., oscillations avant-arrière) tend à être plus important lors de la réalisation de la tâche sémantique ($\bar{m} = 23,51$ mm ; ET = 5,63) que lors de la tâche épisodique ($\bar{m} = 22,13$ mm ; ET = 4,79 ; $F(1,28) = 4,08$; $p = 0,053$). Cependant, la surface à 90% n'est pas plus importante lors de la réalisation de la tâche sémantique ($\bar{m} = 121,97$ mm² ; ET = 78,65) que lors de la tâche épisodique ($\bar{m} = 113,76$ mm² ; ET = 73,41 ; $F(1,28) = 0,75$; $p = 0,39$).

E) Discussion

Cette expérience avait pour but de contraster une condition de remémoration épisodique dans laquelle le participant devait en parallèle maintenir son équilibre debout, à une condition couchée libérant les processus de maintien de l'équilibre. En effet, le maintien de la posture debout recrute des processus spatiaux d'orientation, qui ne sont plus nécessaires en position couchée. Ainsi, si la remémoration épisodique nécessite des processus spatiaux communs au maintien postural, de meilleures performances devraient être mesurées lorsque la tâche est effectuée couchée en comparaison à la condition où elle est effectuée debout. Cet effet étant supposé spécifique à la mémoire épisodique, les performances à la tâche sémantique ne devraient donc pas être modulées par la position dans laquelle est résolue la tâche. Les résultats ne mettent en évidence aucun des effets d'interaction attendus entre la position et le type de tâche mnésique, que ce soit pour le pourcentage de bonnes réponses ou le temps de réponse.

Processus spatiaux et position posturale

Cette expérience n'apporte donc aucun support à notre hypothèse sur les performances mnésiques. Nous pouvons néanmoins nous interroger sur le choix de la position couchée comme situation expérimentale libérant les processus spatiaux pour la réalisation des tâches mnésiques. L'absence d'effet pourrait être due à un ensemble d'effets opposés. En effet, les données disponibles dans la littérature soutiennent l'hypothèse d'un effet général de la position couchée sur un ensemble de tâches dans le sens d'une diminution des performances. Cet effet n'est pas mis en évidence ici, mais peut indiquer à un niveau général que la position couchée est moins neutre que supposée dans cette expérience. Cette position a été également décrite comme propice à l'apparition de sensations de se retrouver hors de son corps (*out-of-body*

expérience, pour une revue des conditions favorables à cette expérience, notamment la position du corps voir Bünning et Blancke, 2005). Cet état est défini comme une désincarnation, avec l'hypothèse d'une diminution de l'intégration des informations corporelles. Schwabe et Blanke (2008) proposent que les signaux vestibulaires soient ambigus en position couchée et que l'interprétation du signal soit biaisée vers une position debout. Ces sensations seraient donc dues à une interprétation erronée des informations sensorielles. Il est alors possible de supposer qu'il pourrait être plus difficile de se replacer dans un contexte spatial passé lorsqu'il existe une dissociation entre la position réelle et la position perçue grâce à l'interprétation des informations sensorielles, cette disparité pourrait alors impliquer des processus spatiaux d'orientation pour être résolue. Alors que nous supposons une facilitation de la résolution des tâches de mémoire de par l'absence de maintien de l'équilibre en position couchée, les recherches citées précédemment suggèrent que la position couchée ne libèrerait pas simplement les processus spatiaux comme nous le supposons, mais pourrait également induire une perturbation spécifique de ces processus.

De la même manière, l'alignement du participant avec l'axe gravitaire lors de la position debout pourrait engendrer une facilitation du rappel de mots qui ont également été appris dans un même référentiel (i.e., en position assise le participant est aussi aligné à la gravité, contrairement à la position couchée) alors que l'implication de processus spatiaux dans le maintien de l'équilibre en position debout pourrait perturber la réalisation de la tâche épisodique. Une comparaison systématique entre différentes tâches de difficulté équivalente, mais de nature différente, associée à un contrôle du contexte sensoriel de la situation de double tâche (comme pour la mesure de la posture en position debout) semble indispensable pour départager ces nombreuses hypothèses concernant l'origine de l'effet de la position sur une tâche cognitive et ainsi prédire le sens de l'effet en double tâche (i.e., interférence ou facilitation).

L'absence d'interaction entre la position et la nature de la tâche mnésique pourrait donc être due à l'effet inhibiteur que la position couchée a sur la performance à différentes tâches cognitives. L'effet de partage de processus que cette expérience cherchait à mettre en évidence pourrait être beaucoup plus faible que cet effet inhibiteur et serait donc difficile à mettre en évidence avec ce paradigme expérimental. Il serait alors possible d'envisager une autre position dans laquelle la demande en termes de maintien postural est réduite le plus possible, par exemple en utilisant la position assise dans un « cocon ». Cette manipulation permettrait de minimiser le contrôle postural puisque le participant serait immobilisé dans le dispositif qui le

maintien assis (i.e., il ne peut ni pencher vers l'arrière ni sur les côtés) et d'éviter la position couchée qui semble impliquer des activations physiologiques spécifiques, à l'origine d'inhibitions fortes du système cognitif.

Équivalence des tâches

Les données mettent en évidence un pourcentage de bonnes réponses plus important pour la tâche de rappel de source que pour la tâche de jugement de similarité. Il est alors possible de considérer que la tâche de mémoire épisodique est plus facile que la tâche de mémoire sémantique. À noter que, comme l'hypothèse porte sur l'interaction entre la tâche de mémoire et la position, la difficulté inégale des deux tâches ne serait pas un problème même si nous considérons la tâche épisodique comme la plus simple à réaliser. En effet, la tâche épisodique serait à la fois la plus facile et c'est également la tâche que nous nous attendons à voir négativement impactée par la position en condition debout. Il est en théorie plus difficile de moduler la performance à une tâche facile, que ce soit dans le sens d'une dégradation ou d'une facilitation, grâce à la situation expérimentale. Ainsi, avec les tâches que nous avons choisies, la situation expérimentale est un peu plus défavorable à notre hypothèse (i.e., observer une interférence limitée à la tâche épisodique). Autrement dit, si l'interaction entre la tâche mnésique et la situation posturale est observée, que ce soit sur des indicateurs de performances mnésiques ou de maintien postural, la difficulté de la tâche ne pourrait donc pas être une explication alternative pour expliquer la totalité des résultats. Pour conclure, si le déséquilibre de difficulté entre les deux tâches mnésiques perdure dans les expériences suivantes, il est nécessaire qu'il soit dans le sens d'une plus grande facilité de la tâche épisodique pour pouvoir conclure en faveur de notre hypothèse.

Dans la littérature de la double tâche, une grande majorité des expériences ne s'intéressent qu'au taux de bonnes réponses. Ainsi, en condition de simple tâche (i.e., tâche cognitive effectuée assise), le pourcentage de bonnes réponses est comparé entre les tâches pour évaluer leur difficulté. En situation de double tâche, les variations de pourcentage de bonnes réponses, par rapport à la condition de simple tâche, sont interprétées en termes d'interférence. L'observation d'une diminution du pourcentage de bonnes réponses est limitée à des situations de double tâche complexes à la fois au niveau postural (e.g., position en Romberg ou sur un pied) et cognitif (e.g., tâche de mémoire à court terme dépassant l'empan mnésique du participant), situation que nous ne testerons pas dans cette thèse. Dans cette expérience, nous avons choisi de mesurer puis d'analyser les temps de réponse pour donner des indices sur le processus cognitif à l'œuvre pendant la résolution de la tâche mnésique. Les différences de

temps de réponse sont importantes entre les deux tâches, ce qui questionne notamment le choix de la temporalité des essais. En regardant les temps de réponse, il semble que cette absence de contraintes au niveau du temps de réponse pour chaque essai donne lieu à des stratégies de résolution qui accentuent la différence entre les deux tâches. Pour la tâche sémantique, la consigne spécifie qu'il faut désigner la caractéristique sur laquelle les deux objets se ressemblent *le plus*. Il se peut donc que certaines paires d'objets se ressemblent sur plus d'une caractéristique commune de prime abord. Ainsi, pour choisir la caractéristique la plus ressemblante, une vérification des autres possibilités pourrait s'avérer nécessaire. Une revue séquentielle des trois réponses possibles engendrerait donc un temps de réponse plus long. Au contraire, dans le cas de la tâche épisodique, une telle vérification n'est sans doute pas nécessaire. Une fois la bonne réponse trouvée, la certitude de la réponse ne s'évaluerait pas en fonction des deux autres propositions, mais se baserait plutôt sur des indices comme la sensation de revivre, ou la fluence associée à l'association mot/circonstance d'apprentissage. Ainsi, le temps de réponse ne semble pas être, dans ce cas, une mesure informatrice de la difficulté de la tâche (e.g., elle peut être le résultat d'une série d'opérations simples à effectuer séquentiellement) et pourrait plutôt refléter la stratégie de résolution. Il devient indispensable de limiter le temps de réponse à chaque essai, dans le but d'imposer un critère de décision quant à la précision de la réponse (i.e., les trois réponses possibles ne peuvent être comparées entre elles que pendant un temps limité dans le cas de la tâche sémantique) et ainsi limiter l'impact de la stratégie de résolution sur le temps de réponse en palliant les différences interindividuelles liées au compromis entre temps de réponse et exactitude de la réponse.

L'effet de la tâche mnésique sur la posture

Le range des oscillations posturales est significativement différent entre les deux types de tâches mnésiques. Les durées d'enregistrement diffèrent cependant d'une tâche à l'autre, ce qui limite les conclusions concernant les différences de stabilité posturale pendant la réalisation des tâches cognitives. Un enregistrement plus long signifie que le participant est resté plus longtemps debout et son maintien postural peut en être affecté. Ainsi, le range suggère la présence de modifications posturales sans que nous puissions directement conclure vis-à-vis de la tâche. En moyenne, il y a vingt secondes d'écart entre un enregistrement postural lors de la tâche épisodique comparativement à un enregistrement lors de la tâche sémantique. Même si cet écart moyen n'est pas très important, nous ne pouvons pas exclure la possibilité que la durée du bloc ait influencé l'équilibre du participant ainsi que les mesures posturales (Le Clair et Riach, 1996 ; Ghamkhar et Kahlaee, 2019). La contrainte temporelle de réponse appliquée à

chaque essai servira également un but d'égalisation du temps d'enregistrement postural lors de la réalisation des tâches mnésiques pour permettre la comparaison du stabilokinésigramme obtenu dans chacune des conditions.

Ces analyses préliminaires sont cependant encourageantes et soulignent la complémentarité des mesures posturales avec les mesures comportementales issues de la réalisation de la tâche cognitive. En effet, lors d'une situation de double tâche, l'une et/ou l'autre peu(ven)t être impactée(s) par la réalisation d'une tâche en parallèle. Ainsi, si les performances mnésiques ne sont pas modulées par la nécessité de maintenir son l'équilibre, il est possible que le maintien de l'équilibre ait été modifié pour permettre à la remémoration d'être effectuée. Les théories de repondération sensorielle, avec l'idée qu'il est possible de maintenir son équilibre avec différentes stratégies, sont une base théorique intéressante soutenant l'intérêt de mesurer la posture pendant la réalisation d'une tâche cognitive. La mesure posturale permettrait d'avoir accès à des modifications fines, indiquant un effet de la double tâche qui ne serait pas une dégradation de l'équilibre mais une modulation des processus posturaux. Autrement dit, lorsque dans une situation de double tâche posture-cognition, la tâche cognitive partage des processus avec le maintien postural, ce dernier pourrait être modulé pour que l'équilibre puisse être maintenu simultanément à la résolution de la tâche cognitive. Les variations des indicateurs posturaux seraient donc un indicateur de modifications des processus du maintien de l'équilibre, sans pour autant que l'équilibre soit compromis.

Conclusion

La libération des processus spatiaux d'orientation avec la position couchée n'est peut-être pas assez importante, lorsque cette situation est comparée à une posture facile à maintenir, pour engendrer des différences mesurables au niveau des performances cognitives. Cette expérience pourrait être reconduite, avec des temps de réponses limités, en comparant une situation de posture couchée à une situation de posture plus complexe à maintenir comme le Romberg sensibilisé (i.e., les pieds sont positionnés l'un devant l'autre, les orteils de l'un touchant le talon de l'autre). L'augmentation de la difficulté du maintien postural pourrait engendrer un risque de déséquilibre, qui pourrait amener le participant à privilégier le maintien postural au détriment des tâches cognitives, ce qui engendrerait une diminution des performances à toutes les tâches cognitives sans distinction de nature. Il y a donc un risque de diminuer la sensibilité du paradigme expérimental qui n'aurait plus la possibilité de mettre à jour un partage fin de processus, mais seulement un effet global de partage de ressources dans une situation extrême sur le plan postural et/ou cognitif. Ainsi, le choix d'une posture facile à

maintenir est une nécessité pour que le partage de processus spatiaux d'orientation puisse être mesurable, sans être dissimulé dans un effet plus grand de limitations liées à la double tâche en tant que telle. À la contrainte du choix d'une posture n'engendrant pas de déséquilibre trop important s'ajoute la nécessité d'une mesure posturale en parallèle de la réalisation des tâches cognitives pour mettre à jour d'éventuelles modulations dans le contrôle postural en fonction de la nature de la tâche. En effet, un partage de processus pourrait s'observer sur la posture et non sur la performance à la tâche mnésique. L'expérience suivante permettra cette mesure posturale en opposant deux conditions dans lesquelles le participant se tient debout sur la plateforme posturale.

III- Expérience 2 : Interaction entre la mémoire à long terme et le contrôle postural : effet différentiel en mémoire épisodique et sémantique sur le maintien de la position debout.

Cette expérience a fait l'objet d'une publication : Tixier, M., Cian, C., Barraud, P. A., Laboissiere, R., & Rousset, S. (2021). The Interaction Between Long-Term Memory and Postural Control: Different Effects of Episodic and Semantic Tasks. *Motor Control*, 25(2), 182-197. Voir Annexe III.

A) Raisonnement général et hypothèses

Pour pallier les principales limites de l'expérience précédente, nous avons conçu deux situations expérimentales pour lesquelles la posture était mesurable afin d'accéder aux modifications plus fines de stratégies de maintien de l'équilibre, les performances cognitives semblant être, quant à elles, plus difficiles à moduler. La position debout les yeux ouverts a été opposée à la condition debout les yeux fermés. Cette opposition yeux ouverts/yeux fermés a deux avantages. Tout d'abord, fermer les yeux complexifie le maintien de l'équilibre, tout en restant une position facile à maintenir car la position des pieds écartés à la largeur des hanches permet une certaine stabilité. Ensuite, la suppression de l'information visuelle nécessite une repondération des informations sensorielles à l'origine du maintien de l'équilibre. Cette repondération pourrait être un terrain favorable à l'observation d'une modulation des stratégies posturales due à la résolution simultanée d'une tâche mnésique.

Comme abordé dans le Chapitre 2, la posture est maintenue grâce à une intégration des informations provenant de différents canaux sensoriels (i.e., visuel, proprioceptif, vestibulaire,

somesthésique). Selon la situation, le poids accordé à chacune des informations n'est pas le même (Peterka, 2018). Par exemple, pour maintenir son équilibre dans l'obscurité, les informations proprioceptives ont plus de poids que les informations visuelles dans le maintien de la position de notre corps dans l'espace. Des manipulations expérimentales peuvent engendrer cette repondération. Par exemple, fermer les yeux supprime l'information visuelle, asservir la plateforme aux mouvements du participant supprime les informations proprioceptives en provenance des chevilles, se tenir debout sur un support souple (e.g., mousse) perturbe les informations somesthésiques en provenance de la sole plantaire. Cette conception de la posture a un double impact sur la conceptualisation de cette expérience. En premier lieu, cela implique la présence d'une vicariance dans le maintien postural selon le poids accordé à chaque modalité sensorielle, poids mesurable comportementalement grâce au spectre de fréquences. De nombreuses études utilisent le spectre fréquentiel pour interpréter le poids qu'a chacune des informations sensorielles dans le maintien de l'équilibre (Golomer, Crémieux, Dupui, Isableu et Ohlmann, 1999 ; Nagy et collaborateurs, 2004 ; Salsabili, Bahrpeyma, Esteki, Karimzadeh et Ghomashchi, 2013 ; Kanekar, Lee et Aruin, 2014). Classiquement, le signal est découpé en trois bandes de fréquences pour dissocier l'influence des informations visuelles, vestibulaires-somesthésiques et proprioceptives dans le maintien postural. Cette vicariance peut être expérimentalement induite en supprimant l'information issue d'un canal sensoriel, en demandant au sujet de fermer les yeux par exemple. Si cette vicariance peut être expérimentalement induite par une manipulation de l'environnement sensoriel, elle pourrait également être générée par une autre caractéristique situationnelle, comme par exemple la réalisation d'une tâche cognitive en parallèle du maintien de l'équilibre.

Nous faisons l'hypothèse ici qu'une tâche cognitive partageant des processus spatiaux avec le maintien postural pourrait engendrer une repondération sensorielle qu'une tâche cognitive de même difficulté ne produirait pas, car leurs processus sous-jacents seraient distincts. Le but de cette étude est donc d'évaluer les changements dans le maintien postural lors d'un paradigme de double tâche impliquant une tâche de mémoire à long terme et une tâche de maintien de l'équilibre. De jeunes adultes sans pathologie motrice ont réalisé une tâche de posture seule (i.e., se tenir debout les bras le long du corps, les pieds écartés à la largeur des hanches, avec les yeux ouverts ou fermés) et une double tâche mémoire-posture. La tâche mnésique était soit une tâche sémantique, soit une tâche de mémoire épisodique. Des modulations posturales sont attendues lors de la réalisation d'une tâche de remémoration épisodique car elle impliquerait des processus spatiaux de re-construction alors qu'une tâche sémantique de jugement de similarité ne devrait pas moduler le maintien postural. En effet, il a

été suggéré à plusieurs reprises dans la littérature que l'interférence parfois mesurée lors de l'association du maintien postural à une tâche cognitive serait due à un partage de processus spatiaux (Chong et al., 2010 ; Kerr, Condon et McDonald, 1985 ; Maylor et Wing, 1996 ; Maylor, Allison, et Wing, 2001 ; Vander Velde et Woollacott, 2008 ; VanderVelde, Woollacott et Shumway-Cook, 2005).

Comme le maintien de la posture est relativement facile (i.e., les participants se tiennent debout, les yeux ouverts, jambes écartées à la largeur des hanches avec les bras le long du corps), nous postulons des variations posturales en fonction de l'implication ou non d'un processus spatial en mémoire à long terme. En effet, dans la littérature, la situation de double tâche module les performances cognitives lorsque la posture est difficile à maintenir (Kerr et collaborateurs, 1985 ; Vandervelde et collaborateurs, 2005) alors que des modulations posturales sont majoritairement observées lorsque la posture n'est pas très difficile à maintenir (Vander Velde et Woollacott, 2008). Comme nous sommes ici dans une situation posturale clémente, ce sont des modifications posturales qui sont principalement attendues. Cependant, nous attendons des modifications de stratégies plutôt qu'une déstabilisation. En ce qui concerne la condition yeux fermés, elle devrait augmenter la difficulté du maintien postural. En accord avec la théorie de partage des ressources spatiales, nous prédisons une plus grande sensibilité de la posture à la mémoire épisodique due à leur processus spatial commun. L'interférence devrait être plus facilement observable dans les stratégies posturales pour cette condition yeux fermés.

B) Méthode

1. Participants

Vingt-quatre adultes volontaires ont été rémunérés pour participer à cette expérience (13 femmes et 11 hommes, âgés en moyenne de $20,54 \pm 1,7$ ans, mesurant en moyenne $170,48 \pm 8,90$ cm, et pesant en moyenne $65,23 \pm 13,66$ kg). Tous les participants avaient une vue et une audition normales ou corrigées à la normale. Ils n'ont reporté aucun antécédent de pathologies musculaires liées à l'équilibre. Ils ont reporté ne pas prendre de médicaments pouvant affecter les fonctions cognitives ou l'équilibre. Les participants étaient naïfs quant au but de l'expérience et ont donné leur consentement libre et éclairé avant d'être inclus dans cette étude. Ils étaient informés de leur droit de se retirer à tout moment de l'expérience sans aucune conséquence. Cette recherche a été réalisée en accord avec les standards éthiques de la

déclaration d'Helsinki de 1964 et approuvée par le comité éthique de l'université Grenoble Alpes (IRB00010290-2017-10-03-26).

2. Matériel

Matériel de mesure posturographique. Le même système que pour l'Expérience 1 a été utilisé (une installation similaire a été utilisée par Laboissiere et collaborateurs, 2015). Pendant le maintien postural, les stimuli pour la réalisation des tâches mnésiques étaient présentés via un casque audio et la temporalité des essais était gérée par E-Prime 2.0.

Tâches mnésiques. Les tâches mnésiques ont été reprises de l'Expérience 1 avec pour seule modification l'intégration d'une limite au temps de réponse. Dans l'expérience précédente, les participants avaient pour consignes de répondre le plus rapidement et le plus précisément possible mais n'avaient aucune limite temporelle. L'essai se terminait avec l'énonciation de la réponse choisie. Dans cette expérience, notamment pour que la durée de l'enregistrement postural soit équivalente entre les deux tâches mnésiques, le temps de réponse est limité à trois secondes par essai.

3. Procédure

Après l'apprentissage des listes de mots, qui durait environ 40 minutes, les participants étaient conduits dans une seconde pièce où se trouvait le matériel de mesure posturographique. Cette seconde phase en double tâche durait approximativement 50 minutes. Pour commencer, les consignes pour le maintien postural étaient données aux participants, et une mesure de 30 secondes de la posture les yeux ouverts puis les yeux fermés était effectuée au début de l'expérience. Les participants étaient pieds nus sur la plateforme sur laquelle ils devaient rester debout avec les pieds écartés à la largeur des hanches, les bras tombant naturellement le long du corps. Ils avaient pour consignes de ne pas effectuer de mouvements volontaires pendant la mesure. Un quadrillage de lignes noires sur un fond blanc était positionné face au participant, à une distance d'environ un mètre cinquante. Lors des essais pour lesquels le participant avait les yeux ouverts, il devait regarder droit devant lui et fixer l'intersection de cette grille qui tombait sur l'axe de son regard. Le contour des pieds du participant était tracé sur une feuille blanche fixée au centre de la plateforme pour s'assurer que le placement initial était respecté tout au long de l'expérience, et ce même après une période de repos durant laquelle le participant pouvait descendre de la plateforme et s'asseoir sur une chaise. Ensuite, l'expérimentateur expliquait aux participants les tâches mnésiques. Les participants avaient

ensuite trois essais de familiarisation pour la tâche de jugement de similarité et trois essais de familiarisation pour la tâche de rappel de source.

L'expérience incluait huit blocs, la moitié des blocs était réalisé debout les yeux ouverts et l'autre moitié des blocs debout les yeux fermés. Les conditions s'alternaient et l'ordre des blocs a été contrebalancé. Les blocs étaient séparés par 2 minutes de repos pendant lesquelles le participant s'asseyait sur une chaise. Chaque bloc débutait par une mesure posturale en situation de simple tâche, suivie par six essais de double tâche en mémoire épisodique et six essais de double tâche en mémoire sémantique (dans la même condition visuelle). L'ordre des tâches mnésiques a été contrebalancé entre les blocs et les conditions visuelles (i.e., yeux ouverts et yeux fermés). Les deux tâches mnésiques étaient séparées par un intervalle de 10 secondes pendant lequel les nouvelles consignes étaient présentées auditivement, avec un rappel des trois réponses possibles. Pour les deux tâches mnésiques, les temps de réponse étaient limités à trois secondes et cinq secondes étaient laissées entre chaque essai. Chaque enregistrement postural (i.e., simple tâche, double tâche épisodique et double tâche sémantique) durait 54 secondes. Chaque bloc durait donc approximativement 3 minutes (cf. Figure 4).

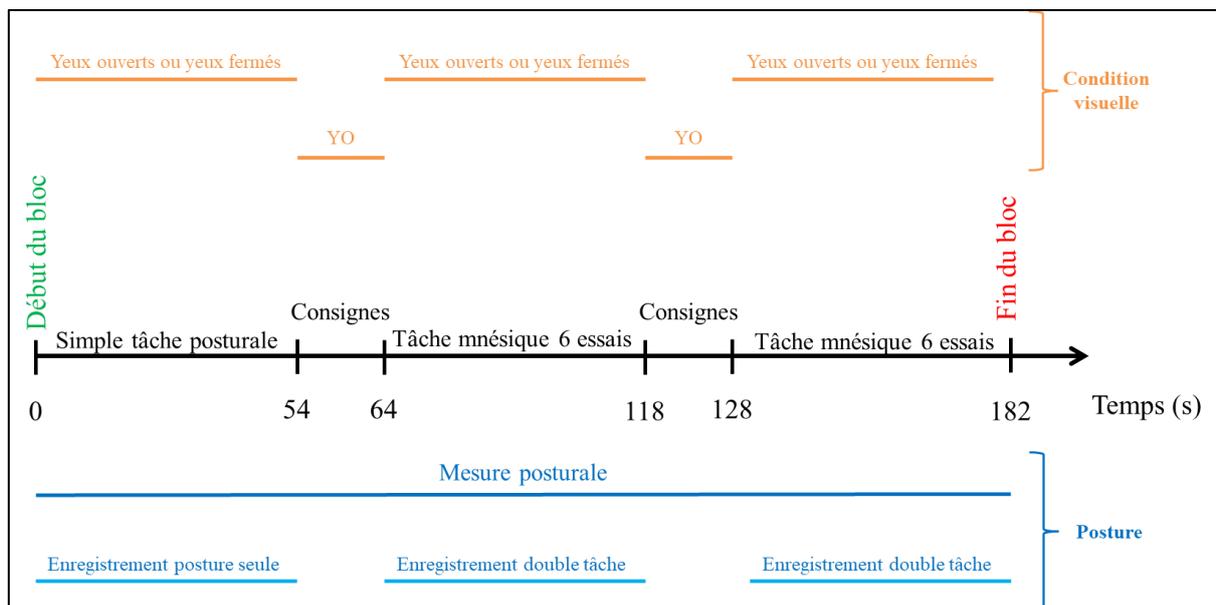


Figure 4: Déroulement d'un bloc expérimental.

La condition de simple tâche posturale était toujours réalisée en premier, l'ordre des tâches mnésiques était contrebalancé entre les blocs. Chaque bloc était effectué soit les yeux ouverts (YO) soit les yeux fermés (YF).

Le participant rouvrait les yeux pendant les consignes. La mesure posturale était effectuée pendant toute la durée du bloc puis le signal d'intérêt, lors de la réalisation de la simple ou de la double tâche, était extrait. Ce sont ces enregistrements de 54 secondes qui ont été analysés.

C) Mesures et tests statistiques

Performance mnésique. Une mesure de l'exactitude de la réponse ainsi que du temps de réponse ont été effectuées pour chaque essai. Tous les essais pour lesquels les temps de réponse étaient supérieurs à 3 secondes ont été considérés comme faux.

Paramètres posturaux. Treize enregistrements posturaux sur les 576 enregistrements recueillis (24 participants * 8 blocs * 3 tâches) ont été exclus des analyses à cause d'une altération de la position initiale des pieds du participant. Pour chaque bloc (i.e., un à huit) et chaque tâche (i.e., épisodique, sémantique et posture seule) cinq paramètres ont été calculés. Pour évaluer la performance posturale, deux paramètres stabilométriques ont été extraits du signal postural filtré. La vitesse moyenne du centre de pression sous les pieds, ainsi que la distance moyenne entre la position du centre de pression sous les pieds à chaque instant et la position au départ de l'essai du centre de pression sous les pieds, ont été calculés selon les recommandations de Prieto et collaborateurs (1996). L'augmentation de valeur de ces paramètres pourrait suggérer une déstabilisation. L'entropie sur l'axe antéro-postérieur a été déterminée en utilisant la méthode développée par Richman et collaborateurs (2011) pour donner un aperçu de la régularité des trajectoires du centre de pression sous les pieds. Les paramètres de calcul utilisés sont ceux recommandés par Ramdani, Seigle, Lagarde, Bouchara, & Bernard, (2009) à savoir $m=3$ et $r=0,3$. L'entropie permet de mettre en évidence le niveau de régularité des oscillations posturales, une forte entropie (i.e., irrégularité du signal) étant synonyme d'une automatisation de la posture. Les calculs ont été effectués grâce au logiciel R (Team R Core, 2018). Enfin, dans le but d'analyser la densité spectrale de puissance, le spectre de fréquence sur la dimension antéro-postérieure a été calculé grâce à la fonction `psdcore` du package `psd` sous R (Barbour & Parker, 2014). La procédure suivie est la même que celle de Laboissiere, Letievant, Ionescu, Barraud, Mazzuca et Cian (2015). Tous les profils fréquentiels sont ensuite caractérisés par un petit nombre de paramètres en utilisant l'analyse en composantes principales. Cette analyse a été réalisée grâce à la fonction `prcomp` sous R. Les valeurs des projections sur les axes des deux premières composantes en antéro-postérieur ont été utilisées pour les analyses statistiques. Les axes ont été réorientés de sorte que les valeurs positives correspondent aux profils au-dessus du profil moyen au niveau de la fréquence initiale 0,02 Hz.

Tests statistiques. Les performances mnésiques sont analysées grâce au logiciel Statistica avec une ANOVA à deux facteurs intrasujets (i.e., position et tâche mnésique). Pour la posture, cinq variables indépendantes sont considérées : la vitesse moyenne, la distance moyenne, l'entropie

antéro-postérieure, les valeurs de projection sur les deux premières composantes du profil fréquentiel de l'axe antéro-postérieur. L'analyse en modèles mixtes prenait en compte la tâche (i.e., absence de tâche vs. épisodique vs. sémantique) et la vision (i.e., yeux ouverts vs. yeux fermés) comme effets fixes. L'ordre des blocs a été considéré comme un facteur continu. Les différences interindividuelles ont été prises en compte en ajoutant la variation de l'intercept entre les sujets comme facteur aléatoire dans le modèle. La fonction lmer du package lme4 sous R (Bates, Maechler, Bolker, Walker, 2015) a permis l'ajustement du modèle. La significativité, au sens statistique, a été évaluée avec la fonction anova pour les effets fixes et ranova pour les effets aléatoires. Les valeurs du F de Fisher et les p-valeurs ont été obtenus grâce à la méthode de Satterthwaite. Pour les effets aléatoires, le « likelihood ratio test » a été utilisé pour estimer la significativité. Les résultats sont considérés comme statistiquement significatifs lorsque $p < 0,05$. Les valeurs moyennes des variables dépendantes en fonction des conditions ont été estimées sur la base des modèles mixtes ajustés en utilisant le package emmeans de R (Lenth, 2019).

D) Résultats

1. Performances mnésiques

Les deux tâches ont été réussies avec un niveau équivalent de réponses correctes (\bar{m} épisodique = 69,4% ; ET = 264,78 ; \bar{m} sémantique = 71,5% ; ET = 198,20 ; $F(1,23) = 0,64$; $p = 0,43$). Les performances étaient supérieures au hasard (i.e., 33% ; $p < 0,001$). Il n'y a pas d'effet de la vision (\bar{m} yeux fermés = 69,24 ; ET = 280,87 ; \bar{m} yeux ouverts = 71,75 ; ET = 263,05 ; $F(1,23) = 2,24$; $p = 0,82$) ni même d'interaction entre la condition de vision et la tâche mnésique ($F(1,23) = 0,20$; $p = 0,660$). Ces résultats suggèrent que les deux tâches de mémoire sont comparables en termes de difficulté quelle que soit la condition de vision.

Pour les temps de réponse, aucun effet de la condition de vision n'a été mis en évidence ($F(1,23) = 0,12$; $p = 0,73$). Les temps de réponse n'ont pas été allongés par l'augmentation de la difficulté du maintien postural (\bar{m} yeux ouverts = 1480,32 ms ; ET = 263,05 ; \bar{m} yeux fermés = 1467,15 ; ET = 280,87). Un effet de la tâche mnésique a été observé ($F(1,23) = 24,95$; $p < 0,05$), avec des temps de réponse significativement plus courts pour la tâche épisodique ($\bar{m} = 1335,94$ ms ; ET = 264,77) en comparaison à la tâche sémantique ($\bar{m} = 1611,53$ ms ; ET = 198,20). Aucun effet d'interaction entre ces deux facteurs n'a été mis en évidence ($F(1,23) = 0,05$; $p = 0,83$).

2. Paramètres posturaux

- **Distance moyenne** : un effet principal de la vision ($F(1,435.06) = 4,37$; $p < 0,01$) a été mesuré. La condition yeux fermés engendrait une plus grande distance moyenne que la condition yeux ouverts (\bar{m} yeux fermés = 4,73mm ; \bar{m} yeux ouverts = 4,17mm ; SE 0,13). Aucun effet principal de la tâche mnésique ($p = 0.51$) ni d'interaction entre la vision et la tâche ($p = 0.54$) n'a été mis en évidence.

- **Vitesse moyenne** (voir Figure 5A) : il y avait un effet principal de la vision ($F(1,434.99) = 45,00$; $p < 0,001$) et des tâches ($F(2,435) = 4,52$; $p < 0,001$) mais pas d'interaction entre ces facteurs ($p = 0,52$). La vitesse était plus élevée en condition yeux ouverts que yeux fermés (\bar{m} yeux fermés = 8.34 mm/s, \bar{m} yeux ouverts = 6,71 mm/s ; SE 0,43). La vitesse était plus lente pendant la simple tâche que pendant la double tâche (\bar{m} simple tâche = 6,61 mm/s ; \bar{m} double tâche = 7,53 mm/s ; SE 0,41 ; $p < 0,05$). De plus, les déplacements du centre de pression sous les pieds étaient plus rapides pendant la tâche sémantique que la tâche épisodique (\bar{m} sémantique = 7,71 mm/s ; \bar{m} épisodique = 7,33 mm/s ; SE 0,43 ; $p < 0.05$).

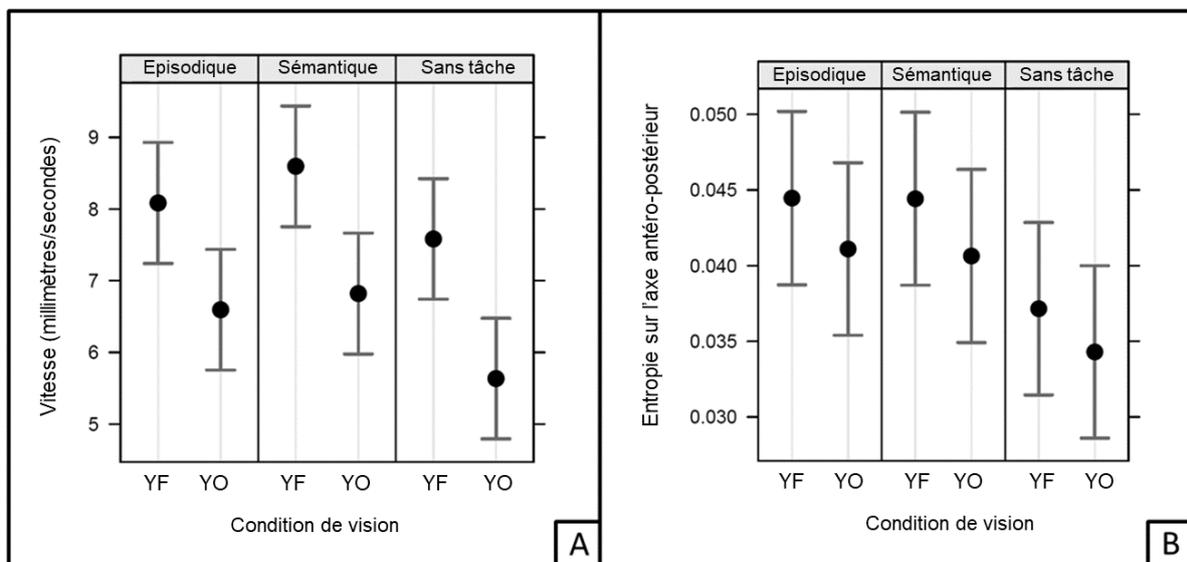


Figure 5: Indicateurs posturaux (vitesse et entropie) en fonction de la tâche cognitive et de la disponibilité de l'information visuelle.

Vitesse moyenne en millimètres par seconde (A) et entropie sur l'axe antéro-postérieur (B) en fonction de la tâche cognitive (i.e., épisodique vs. sémantique vs. absence de tâche) et de la condition de vision (yeux ouverts (YO) vs. yeux fermés (YF)). Les barres verticales correspondent à l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne estimée.

- **L'entropie** (voir Figure 5B) : un effet principal de la vision a été mis en évidence, avec une plus grande entropie dans la condition yeux fermés comparativement à la condition yeux ouverts (\bar{m} yeux fermés = 0,042 ; \bar{m} yeux ouverts = 0,039 ; SE 0,003 ; $p < 0.05$).

Un effet principal de la tâche a également été mesuré, avec une plus grande entropie lorsque les tâches de mémoire sont réalisées par rapport à la condition en simple tâche (\bar{m} simple tâche = 0,036 ; \bar{m} double tâche = 0,043 ; SE 0,003 ; $p < 0,05$). Cependant, aucun effet différentiel entre la tâche de mémoire épisodique et sémantique n'a été mis en évidence (\bar{m} sémantique = 0,043 ; \bar{m} épisodique = 0,043 ; SE 0,003 ; $p = 0,95$).

- **Densité spectrale de puissance** (les deux premières composantes sont présentées sur la Figure 6) : Les deux premières composantes de l'analyse en composantes principales réalisée sur l'axe antéro-postérieur expliquent 77,7% de la variance totale (respectivement 63,3% et 14,4% ; voir Figure 6). La première composante rend compte de la quantité d'énergie présente tout au long du spectre (voir Figure 6A). Tandis que la deuxième composante, toujours sur l'axe antéro-postérieur, représente l'équilibre entre les hautes et basses fréquences, avec une fréquence pivot autour des 0,15 Hz (voir Figure 6C). La **première composante** fait ressortir un effet principal de la vision ($F(1,435)=34,76$; $p < 0,05$; Fig. 6B) avec une énergie plus importante tout le long du spectre pour la condition yeux fermés. Un effet principal de la tâche a également été mis en évidence ($F(2,435) = 4,39$; $p < 0,05$; Fig. 6B), avec moins d'énergie tout le long du spectre pendant la simple tâche comparativement à la condition de double tâche (\bar{m} simple tâche = -0,15 ; \bar{m} double tâche = 0,09 ; SE 0,134 ; $p < 0,05$). Aucune interaction entre ces facteurs n'a été mise en évidence. La **deuxième composante** fait ressortir un effet principal de la vision ($F(1,434.98) = 23,32$; $p < 0,05$; Fig. 6D), avec le profil fréquentiel qui présente plus d'énergie dans les basses fréquences pour la condition yeux ouverts que la condition yeux fermés, et une inversion de ce profil pour les hautes fréquences. Un effet principal de la tâche a été mesuré ($F(2,434.99) = 5,63$; $p < 0,05$; Fig. 6D). Les basses fréquences (en dessous de 0,15 Hz) contiennent plus d'énergie lors de la simple tâche comparativement à la condition de double tâche (\bar{m} simple tâche = 0,282 ; \bar{m} double tâche = -0,15 ; SE 0,153). Le pattern opposé a été observé pour les fréquences dans l'intervalle [0,15 – 2,0 Hz].

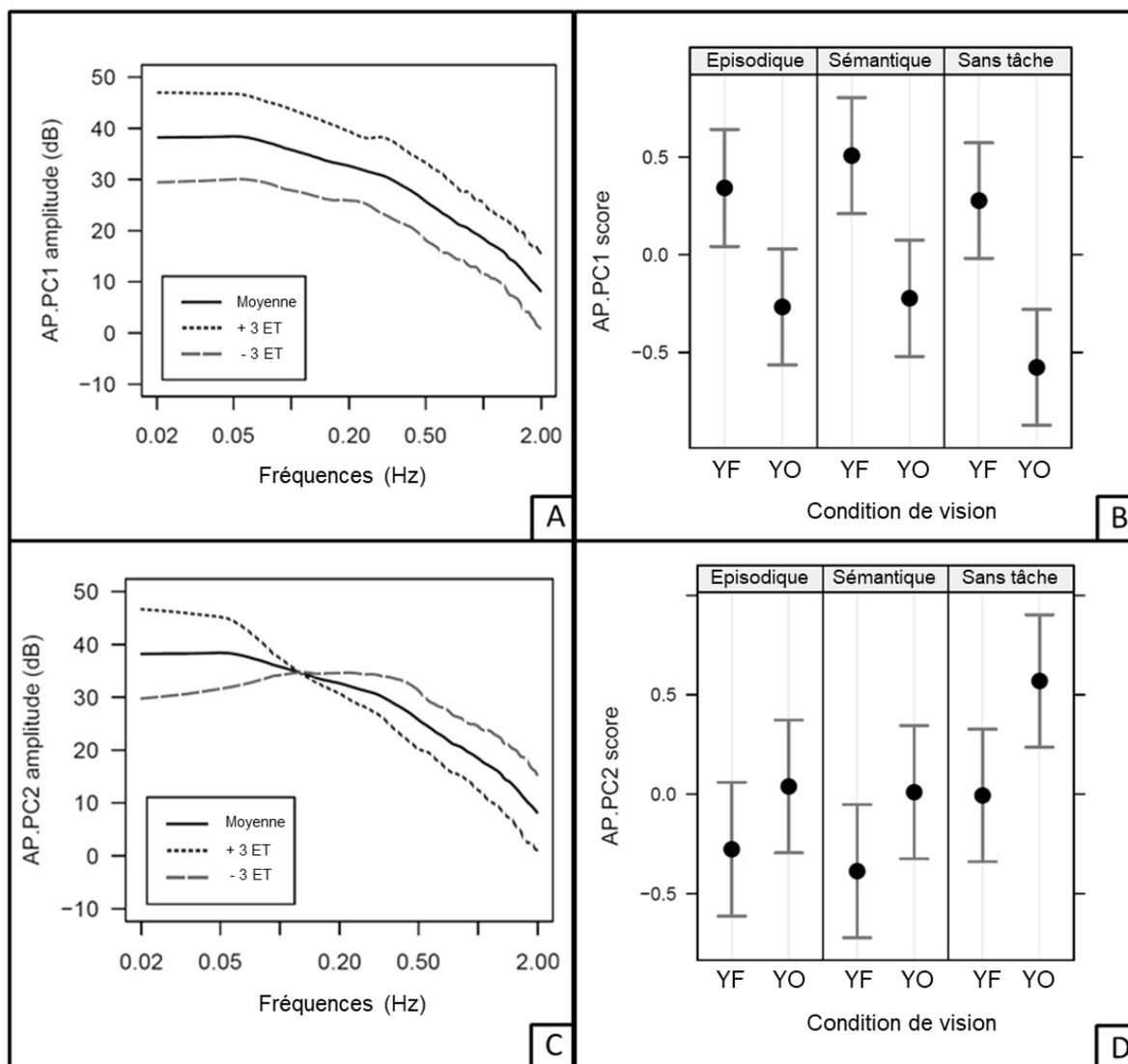


Figure 6: Analyse en composantes principales (ACP) sur la densité spectrale de puissance du signal postural selon l'axe antéro-postérieur.

(A) Courbes de puissance (en dB) en fonction de la fréquence (en Hz) du signal postural sur l'axe antéro-postérieur pour la première composante de l'ACP. La moyenne des profils de densité spectrale correspond au trait plein. Les courbes en pointillés représentent les changements du profil de densité spectrale lors d'une augmentation (points) ou d'une diminution (tirets) de 3 écarts-types par rapport à la moyenne. (B) Moyennes estimées pour chaque condition expérimentale sur la première composante de l'ACP. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de cette moyenne. (C) Courbes de puissance (en dB) en fonction de la fréquence (en Hz) du signal postural sur l'axe antéro-postérieur pour la deuxième composante de l'ACP. La moyenne des profils de densité spectrale correspond au trait plein. Les courbes en pointillés représentent les changements du profil de densité spectrale lors d'une augmentation (points) ou d'une diminution (tirets) de 3 écarts-types par rapport à la moyenne. (D) Moyennes estimées pour chaque condition expérimentale sur la deuxième composante de l'ACP. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de cette moyenne.

E) Discussion

En demandant aux participants de réaliser deux tâches de mémoire à long terme d'un niveau de difficulté similaire, mais différant sur les processus impliqués, notre but était d'éclaircir quelle caractéristique de la situation de double tâche produirait une interférence avec le maintien postural. Les principaux résultats montrent que maintenir une position debout, et ce même dans des conditions qui défient légèrement notre équilibre (i.e., absence de vision), n'affecte pas les performances cognitives. Néanmoins, le maintien postural semble être qualitativement différent en fonction de la tâche mnésique réalisée en parallèle.

Comparaison d'une situation de simple tâche à une situation de double tâche : un moyen d'évaluer l'effet global de la mémoire à long terme sur la posture

Lors de la situation de double tâche la vitesse moyenne de déplacement du CoP est plus grande que dans la situation de simple tâche. Cependant, la distance ne diffère pas entre les deux conditions (i.e., simple tâche versus double tâche). Dans la littérature, la vitesse de déplacement du CoP a été associée à la mesure de distance moyenne pour être interprétée en termes de quantité d'activité posturale pour atteindre un niveau de stabilité donné (Hufschmidt, Dichgans, Mauritz et Hufschmidt, 1980 ; Maki, Holliday et Fernie, 1990 ; Prieto et al., 1996). Interprétés ensemble, ces indicateurs mettent en évidence une stabilité équivalente entre la situation de simple et de double tâche, mais une activité différente pour atteindre cette stabilité. Lors de la double tâche, l'activité posturale augmente par rapport à la situation de simple tâche mais ne peut être interprétée comme un déséquilibre, car le déplacement du CoP reste dans une surface similaire entre les deux conditions comme l'indique la distance moyenne.

Les situations de simple et de double tâche se distinguent également sur l'entropie du signal postural. Dans la situation de double tâche, les trajectoires du CoP sont moins régulières (augmentation de l'entropie). Cette diminution de la régularité des oscillations posturales a été associée à la diminution de l'attention investie dans le contrôle de la posture (Roerdink, De Haart, Daffertshofer, Donker et Beek, 2006 ; Donker, Roerdink, Greven, et Beek, 2007 ; Stins, Michielsen, Roerdink et Beek, 2009). En double tâche, l'attention serait alors portée sur la tâche cognitive, ce qui engendrerait un contrôle plus automatique de la posture (Woollacott et Shumway-Cook, 2002 ; Polskaia, Richer, Dionne et Lajoie, 2015). Une plus grande proportion de hautes fréquences dans le signal postural a également été associée à un contrôle postural plus automatique (Wulf, McNevin et Shea, 2001). Nous répliquons ce résultat avec la mise en évidence d'une énergie plus importante dans les hautes fréquences en situation de double tâche

alors qu'en situation de simple tâche ce sont les basses fréquences qui contiennent le plus d'énergie.

La composition du spectre de fréquence du signal postural est interprétée, dans la littérature, comme un indicateur des contributions des différents systèmes sensoriels dans le maintien de la posture. L'intégration de ces informations se ferait à la fois en fonction de l'environnement et de la tâche cognitive si elle est présente (Horak, 2006 ; Oie, Kiemel et Jeka, 2002). Classiquement, les basses fréquences sont associées à l'activité régulatrice des informations visuelles, les fréquences moyennes à celle des informations vestibulaires et somesthésiques alors que les plus hautes fréquences sont associées à l'impact des informations proprioceptives sur le signal postural (Amblard, Crémieux, Marchand et Carblanc, 1985 ; Golomer et Dupui, 2000 ; Horak & Nashner, 1986). Ainsi, une modification de la proportion de chaque bande de fréquences est associée à une repondération de l'importance de chaque type d'information sensorielle dans l'activité de maintien de l'équilibre (pour une revue des effets de perturbation des différents systèmes sensoriels sur la composition fréquentielle du signal postural et la notion de repondération voir Peterka, 2018). McGeehan, Woollacott et Dalton (2017) ont mis en évidence un contrôle postural guidé par les informations vestibulaires lors d'une situation de double tâche avec une charge cognitive élevée. Cette forte implication vestibulaire dans le contrôle postural pourrait induire une augmentation des fréquences présentes dans le signal postural comme nous l'avons observé dans cette expérience.

Il est nécessaire de souligner la présence d'articulation en situation de double tâche qui n'est pas présente en situation de simple tâche. Comme nous l'avons abordée au début de ce chapitre, les réponses à voix hautes peuvent induire des modifications posturales. Cette variable pourrait donc constituer une explication alternative à l'augmentation de la vitesse et des fréquences d'oscillation. Cependant, la présence d'articulation ne peut être avancée comme seule explication aux changements posturaux associés à la nature de la tâche mnésique car les deux tâches cognitives impliquent une réponse à voix haute. De plus, le nombre de mots et leur longueur ont été contrôlés. Les comparaisons présentées dans le paragraphe suivant ne sont donc pas soumises à cette limite méthodologique. Il sera nécessaire de contrôler pour cette articulation dans les expériences futures, en proposant par exemple une simple répétition de mots en plus du maintien postural pour remplacer la condition de simple tâche.

Maintien postural pendant la réalisation d'une tâche mnésique : comparaison entre la tâche mnésique épisodique et sémantique

Les résultats suggèrent que la nature de la tâche mnésique a un impact sur le maintien postural. En effet, la vitesse de déplacement du CoP est plus importante pendant la réalisation de la tâche sémantique en comparaison à la tâche épisodique. Une augmentation de la vitesse a été attribuée dans la littérature à une augmentation de la difficulté de la tâche cognitive ou à une attention plus importante devant être accordée à la tâche. Même si nous ne pouvons pas totalement exclure ces explications alternatives, le taux de réponses correctes équivalent entre les deux tâches cognitives suggère que les deux tâches mnésiques sont de difficulté équivalente. De plus, l'équivalence en termes d'entropie entre les deux situations de double tâche suggère que les deux tâches mnésiques nécessitent le même niveau d'attention pour être résolues (Donker et collaborateurs, 2007 ; Stins et collaborateurs, 2009). Ainsi, cette différence de vitesse pourrait être interprétée comme mettant en évidence un effet du processus impliqué dans la résolution de la tâche supraposturale. En effet, les deux tâches mnésiques sont similaires en termes de difficulté, d'imagerie mentale, de contact perceptif avec l'environnement, de nature de la réponse, mais différent sur l'implication d'un processus spatial dans leur résolution. Lors de la remémoration épisodique, une scène spatialement cohérente serait générée pour répondre alors que la tâche sémantique implique l'évocation d'un objet en dehors de tout contexte spatial. La vitesse plus faible observée lors de la réalisation de la tâche épisodique peut être interprétée en parallèle des résultats de Maylor et collaborateurs (2001). Dans leur expérience, le participant effectue une tâche de mémoire de travail soit spatiale, soit verbale. Une analyse de l'activité posturale est réalisée pendant l'encodage et pendant le maintien en mémoire de travail des stimuli. La vitesse de déplacement du CoP est toujours inférieure pendant la tâche spatiale comparativement à la tâche verbale, que ce soit à l'encodage ou pendant le maintien des informations en mémoire de travail. Ainsi, cette vitesse de déplacement plus faible observée dans notre expérience constituerait un indice de la nature spatiale de la tâche de remémoration épisodique.

Augmentation de la difficulté posturale : effet de la privation visuelle sur la situation de double tâche

L'augmentation de la vitesse et de la distance moyenne en condition yeux fermés par rapport à la condition yeux ouverts répliquent les données disponibles dans la littérature (Prieto et collaborateurs, 1996). En désaccord avec certains résultats de la littérature (Donker et al., 2007 ; Stins et al., 2009), l'irrégularité du CoP augmente yeux fermés (i.e. tâche posturale

estimée plus difficile). Cependant, une entropie élevée peut également être associée à un contrôle postural moins efficace lorsque l'instabilité augmente (Borg & Laxaback, 2010). Considérés dans leur ensemble ces indicateurs posturaux suggèrent que le maintien de la posture les yeux fermés est plus difficile que le maintien de la posture les yeux ouverts. Dans la littérature, l'augmentation des contraintes posturales en situation de double tâche a pour effet de diminuer les performances cognitives (e.g., Fraizer et Mitra, 2008). Nous n'observons cependant pas d'interférence entre situation posturale et tâche cognitive dans cette expérience malgré la condition yeux fermés, plus difficile à maintenir. Cette position debout les yeux fermés est toutefois une condition de maintien de l'équilibre beaucoup plus facile que les situations debout en Romberg généralement utilisées dans la littérature.

IV- Conclusion générale

Les résultats de ces deux expériences vont dans le sens des données de la littérature qui mettent en évidence un effet de la situation de double tâche sur la posture lorsque l'équilibre n'est pas menacé, et aucun effet sur les performances cognitives. La complexification du maintien postural dans ces deux expériences n'était pas suffisante pour engendrer une modulation des performances à la tâche mnésique. Dans l'Expérience 1, la mesure posturale avait été envisagée comme un indicateur de l'instabilité, avec l'hypothèse que l'utilisation de processus spatiaux pour la réalisation de la tâche cognitive réduirait leur disponibilité pour le maintien de l'équilibre qui serait donc moins performant (i.e., mesure d'une déstabilisation). Cependant, dans l'Expérience 2, les modifications posturales ont été abordées avec une optique de vicariance, c'est-à-dire avec l'idée que la posture peut être réalisée de différentes manières et que sa mesure serait un indicateur des processus utilisés. Les résultats de l'Expérience 2 montrent en effet une différence dans le maintien postural entre la tâche épisodique et la tâche sémantique, différence observée dans la littérature lors de l'opposition d'une tâche de mémoire de travail spatiale à une tâche de mémoire de travail verbale. Ces données suggèrent donc la présence d'un processus spatial lors de la remémoration épisodique, qui n'est pas présent lors de jugements sémantiques. Ces deux tâches étant équivalentes en termes d'imagerie mentale, de difficulté, de demande attentionnelle et de stimulation périphérique, elles ne se distinguent entre elles que par la nécessité de faire appel à un processus spatial dans le cas de la remémoration épisodique.

La limitation des temps de réponse a permis, dans l'Expérience 2 d'égaliser le pourcentage de bonnes réponses, même si les temps de réponse restent légèrement plus longs

dans la tâche sémantique. Cette différence pourrait être due à un passage en revue des trois réponses possibles avant l'arrêt de la décision sur un critère. L'équivalence des tâches est soutenue par une seconde mesure posturale : l'entropie. Cet indicateur suggère que le niveau attentionnel requis pour résoudre les deux tâches en parallèle du maintien postural est sensiblement similaire. L'entropie renseigne sur l'effet de la charge cognitive associée à la réalisation de la tâche supra-posturale sur le maintien postural. L'évaluation subjective de la difficulté de la tâche cognitive n'a pas été retenue pour plusieurs raisons. La première est purement pratique : la mesure aurait dû se faire à une certaine distance de la tâche, c'est-à-dire à la fin de chaque bloc. Dans ce cas, ces mesures d'évaluation peuvent être parasitées par une composante de mémoire (e.g., préparer sa réponse à l'avance et la maintenir ou au contraire noter moins précisément la tâche la plus distante temporellement du moment de l'évaluation). De plus, les consignes précisaient aux participants de se concentrer sur l'essai suivant s'ils échouaient à donner une réponse ou s'ils se rendaient compte qu'ils avaient répondu faux à l'essai en cours. La demande d'une évaluation subjective incite au contraire le participant à réfléchir sur ses propres performances en parallèle de la tâche. De plus, l'aspect de nouveauté de la tâche sémantique, dans le sens où elle est inconnue des participants car créée uniquement dans le but d'évaluer la mémoire sémantique en laboratoire, pourrait biaiser la perception de la difficulté (sans pour autant modifier la charge cognitive liée à cette tâche). La tâche de mémoire de source, elle, est réalisée régulièrement dans la vie de tous les jours (e.g., qui m'a donné cette information ? Où ai-je vu cette affiche ? etc...) et est donc familière aux participants ce qui pourrait engendrer une facilité perçue.

La manipulation de la présence de la vision pour le maintien de l'équilibre ne semble pas suffisante pour mettre en évidence l'interaction attendue entre la nature de la tâche cognitive et la posture de par leur partage de processus spatiaux. Il est important de souligner que les processus spatiaux mis en œuvre dans le maintien postural ne reposent pas uniquement sur l'information visuelle, bien que la vision donne des informations relatives à la position de l'individu par rapport aux objets et plus largement dans l'environnement. Les informations proprioceptives, vestibulaires et somesthésiques renseignent sur l'orientation du corps dans l'espace (e.g., position de la tête, alignement à la gravité, position des membres dans l'espace...) qui est indispensable dans un monde en trois dimensions. Ainsi, le maintien postural nécessite toujours des processus spatiaux pour se réaliser, mais ce maintien de l'équilibre peut être plus ou moins difficile en fonction des informations sensorielles disponibles ou des contraintes de l'environnement (e.g., mouvement de la surface sur laquelle

l'individu se tient debout). Les expériences suivantes auront donc pour but d'augmenter, et non plus diminuer ou maintenir constant, l'implication des processus spatiaux d'orientation en jouant sur l'environnement dans lequel la posture doit être maintenue.

Chapitre 4

LA VECTION COMME PERTURBATEUR DE L'ORIENTATION POSTURALE POUR METTRE EN EVIDENCE UN PROCESSUS SPATIAL LORS DE LA REMEMORATION EPISODIQUE

Nous venons de voir que même lors d'une situation posturale ne mettant pas en danger l'équilibre, il était possible de mesurer des différences de stratégies posturales qui vont dans le sens de l'implication d'un processus spatial lors de la remémoration épisodique. Nous avons donc cherché à créer, dans les expériences suivantes, une situation posturale dans laquelle l'implication des processus spatiaux d'orientation serait encore plus importante, peut-être même assez forte pour moduler les performances mnésiques. En suivant le même raisonnement que dans le chapitre précédent, si les processus spatiaux sont communs à la remémoration et au maintien postural, ils ne pourraient pas être utilisés simultanément pour atteindre deux buts distincts (i.e., maintenir l'équilibre et se souvenir). Ainsi, les performances de remémoration épisodique devraient diminuer car les processus spatiaux seraient moins disponibles pour réaliser cette tâche mnésique. Cette interférence ne serait pas observée pour la tâche mnésique de nature sémantique car elle n'implique pas ces processus spatiaux. Pour mobiliser ces processus spatiaux, la vection offre une situation intéressante sur deux points principaux : par l'impact qu'elle peut avoir sur l'orientation spatiale perçue, et par le fait qu'elle module la posture alors que nous modifions seulement l'environnement dans lequel évolue le sujet sans jouer directement sur sa position.

I- Vection, définitions et généralités

A) Vection des définitions

La vection désigne toute sensation de mouvement de soi qu'elle soit réelle ou illusoire (voir Palmisano, Allison, Schira et Barry (2015) pour une revue des différentes définitions disponibles dans la littérature). Le plus souvent, la vection est étudiée dans son sens d'illusion de mouvement généré visuellement. À noter cependant, que d'autres sens peuvent générer la vection comme par exemple une stimulation auditive dont la source se déplace (e.g., Riecke, Feuereissen et Riser, 2008). Ainsi, le couplage des stimulations pour créer une situation de vection multisensorielle a été largement étudié (i.e., combinaison d'informations sensorielles visuelles et auditives par exemple), notamment de par son lien avec la réalité virtuelle (e.g., Riecke, Feuereissen, Rieser et McNamara, 2001 ; Våljamäe, Larsson, Västfjäll et Kleiner, 2013 ; Keshavarz, Hettinger, Vena et Campos, 2014). Tout au long de ce chapitre nous allons nous restreindre à l'étude de la vection comme sensation illusoire de mouvement induite visuellement. Ainsi, *vection* ne sera jamais précédée de *sensation* dont le sens est déjà inclus dans sa définition.

Lorsque l'ensemble des informations présentes dans notre champ visuel se déplace dans le même sens, nous l'interprétons comme un mouvement de nous-mêmes dans l'espace. En effet, ces mouvements uniformes étendus à l'ensemble du champ visuel et captés par le système visuel sont généralement issus de notre propre déplacement dans l'environnement. Par exemple, lorsqu'un individu se déplace vers l'avant, il perçoit visuellement un défilement des informations visuelles vers l'arrière (i.e., flux visuel), soit dans le sens opposé à son mouvement, avec un défilement plus rapide des objets proches de lui par rapport à ceux plus éloignés. Cette interprétation du flux visuel comme un mouvement de soi pourrait être issue de nos expériences passées dans la majorité desquelles le monde est stable (Dichgans et Brandt, 1978). Bien sûr, certains objets peuvent se déplacer dans l'espace (e.g., les feuilles tombent, les véhicules roulent...), mais ce mouvement n'occupe pas la majeure partie du champ visuel. Cependant, lorsque le mouvement occupe l'ensemble du champ visuel périphérique il est possible de ressentir une illusion de mouvement dans certaines situations écologiques. Par exemple, lorsque vous êtes installé dans un train stationné en gare attendant le départ en lisant un livre ou regardant votre téléphone portable, le départ du train stationné sur le quai d'à côté génère la sensation que c'est le train dans lequel vous êtes installés qui est en train de se déplacer. Dans ce cas, le mouvement d'un objet (ici le train d'à côté) occupe une grande partie

du champ visuel périphérique et est attribué à un mouvement de soi (ici plus spécifiquement au train dans lequel l'individu est assis), ce qui génère une expérience devection.

B) Les différents types devection

Il est possible de créer visuellement deux catégories d'illusions de mouvement : les vections linéaires et les vections circulaires. Les vections circulaires se définissent comme une sensation de mouvement en rotation. Les vections linéaires sont quant à elles des illusions de mouvement en ligne droite. Dans chacune de ces catégories, le mouvement illusoire peut être ressenti le long des trois dimensions. Comme le flux visuel perçu est opposé à la direction du déplacement réel, les stimulations visuelles doivent être présentées dans le sens inverse de l'illusion de mouvement recherchée.

Concernant les vections circulaires (voir Figure 7), la vection en lacet est l'illusion de tourner sur soi-même autour de l'axe longitudinal (i.e., vertical). Elle est générée expérimentalement grâce à des alternances de barres noires et blanches qui se déplacent tout autour du participant en suivant un cercle dont la tête de l'observateur marque le centre. Les rotations autour de l'axe médio-latéral sont des illusions d'inclinaison vers l'avant ou vers l'arrière, appelées vection en tangage. Enfin, la vection en roulis consiste en une stimulation visuelle en rotation autour de l'axe perpendiculaire au corps du sujet (i.e., l'axe antéro-postérieur). Le centre de la rotation est aligné avec la ligne du regard du participant ce qui induit une sensation de pencher, à droite ou à gauche, dans le sens inverse du mouvement. Les informations visuelles en mouvement angulaire uniforme vers la droite sont interprétées comme un mouvement de soi vers la gauche dans le plan parallèle au plan de présentation de la stimulation.

Les vections linéaires sont composées des mouvements linéaires sur les trois axes cités précédemment. Le mouvement sur l'axe longitudinal correspond à une illusion de mouvement de haut en bas (ou inversement). Une illusion de mouvement le long de l'axe médio-latéral est caractérisée par une illusion de déplacement latéral (i.e., en crabe) lorsque la stimulation visuelle présente un mouvement de la droite vers la gauche ou inversement. Dans ces deux cas, les stimuli les plus souvent utilisés sont une alternance de barres noires et blanches, soit horizontales dans le cas de la vection linéaire verticale, soit verticales dans le cas de la vection linéaire latérale. Quant à l'illusion de se déplacer vers l'avant ou l'arrière, elle est générée le plus souvent avec un nuage de points blancs sur fond noir, se déplaçant avec une impression de profondeur. Les points partent du bord de l'écran pour se diriger vers le centre dans le cas de

l'illusion de mouvement vers l'arrière et se déplacent dans le sens inverse pour générer une illusion de déplacement vers l'avant.

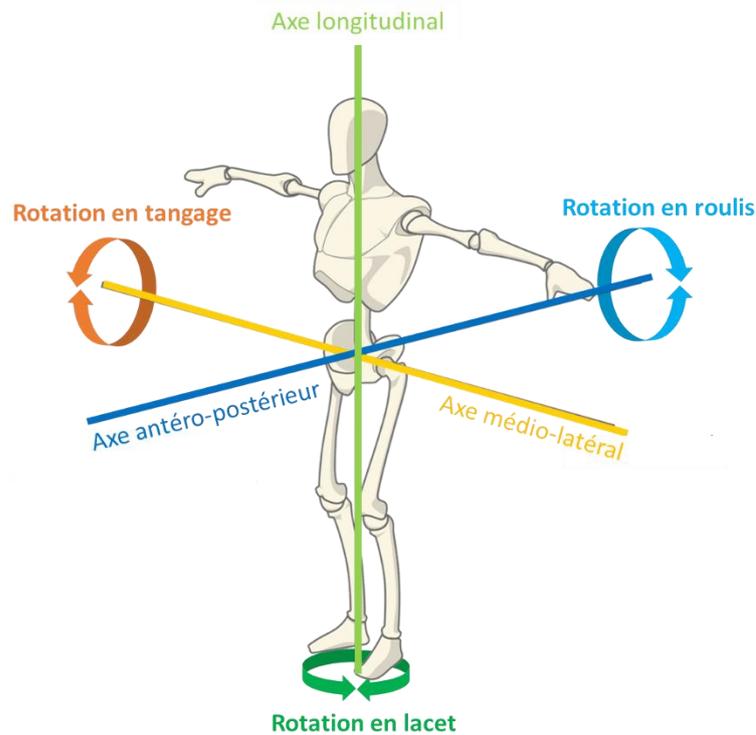


Figure 7: Illustration des différents axes de rotation possibles (adapté de <https://www.sci-sport.com/theorie/chapitre-2-description-anatomique-du-mouvement.php>).

L'axe médio-latéral est celui traversant l'individu de la gauche vers la droite, la rotation autour de cet axe est appelée **tangage**. Il s'agit d'une sensation d'inclinaison vers l'avant ou vers l'arrière qui peut s'étendre de quelques degrés à 360 degrés. **L'axe antéro-postérieur** est celui traversant le sujet de l'arrière vers l'avant, la rotation autour de cet axe est appelée **roulis**. Il s'agit d'une sensation d'inclinaison vers la droite ou vers la gauche qui peut s'étendre de quelques degrés à 360 degrés. **L'axe longitudinal** est celui traversant le sujet du bas vers le haut, la rotation autour de cet axe est appelée rotation en **lacet**. Il s'agit d'une sensation de tourner sur soi-même vers la gauche ou vers la droite qui peut s'étendre de quelques degrés à 360 degrés.

Il est bien sûr possible de combiner ces stimulations visuelles afin de générer des illusions de mouvement combinant une rotation et un déplacement. Par exemple, les points se déplacent à la fois de l'extérieur de l'écran vers le centre en profondeur (illusion de mouvement vers l'arrière), avec un mouvement en rotation, c'est-à-dire que l'ensemble des points se déplace uniformément en cercle (un cercle de plus en plus petit au fur et à mesure que le point se rapproche du centre). Chaque point se déplace alors selon une trajectoire en forme de tourbillon. Cette stimulation génère une sensation de se déplacer vers l'avant en tournant autour de l'axe antéro-postérieur (i.e.,vection en roulis).

Afin de quantifier la vection, plusieurs mesures sont possibles. Généralement, le participant se tient assis face à la stimulation visuelle en mouvement avec une manette dans la main et il a pour consigne d'appuyer sur un bouton lorsqu'il a la sensation de bouger, et de le relâcher lorsque la sensation disparaît (i.e., impression que c'est l'environnement qui bouge et non lui-même). À partir de cette modalité de réponse il est possible d'extraire la latence de la vection (i.e., temps qu'il faut à partir du début de la stimulation visuelle pour générer une illusion de mouvement) et la durée de la vection (i.e., exprimée en pourcentage, il s'agit du temps total d'appui sur le bouton réponse par rapport au temps de stimulation). Associé à ces mesures, il est possible de questionner le participant sur l'intensité moyenne de l'illusion de mouvement ressentie pendant la présentation du stimulus après la fin de l'essai grâce à une échelle d'auto-évaluation. Une autre mesure de moins en moins utilisée est l'auto-report de la vitesse du mouvement ressenti.

C) Comment générer expérimentalement une vection ? Les caractéristiques physiques de la stimulation

Certaines caractéristiques de la stimulation visuelle peuvent influencer l'interprétation subjective de la stimulation visuelle dans le sens d'un mouvement de soi ou au contraire dans le sens d'un mouvement de l'environnement. Concernant les vections circulaires, Held, Dichgans et Bauer (1975) observent qu'une faible vitesse de rotation (entre 2,5 et 10 degrés par seconde) favorise la sensation d'être face à un environnement en mouvement. À plus grande vitesse, une alternance entre mouvement de soi et mouvement du monde extérieur est observée. En comparant les différentes vitesses de rotation, il apparaît qu'une rotation comprise entre 30-40 degrés par seconde semble être la plus favorable à l'apparition de la vection. L'excentricité de la présentation de la stimulation dans le champ visuel module également la vection. Lorsque le mouvement est présenté en vision centrale, la sensation d'être immobile face à un monde en mouvement prédomine, alors que, présenté en vision périphérique, le mouvement engendre plus souvent une sensation de mouvement de soi et de stabilité de l'environnement (Brandt, Dichgans et Koenig, 1973).

L'impact de la présence de couleurs dans la stimulation visuelle a également été étudié (Bonato et Bubka, 2006). L'ajout de couleurs, comparativement à une stimulation en noir et blanc, diminue la latence de la vection et augmente sa durée pendant la stimulation visuelle. De la même manière, la complexification spatiale du stimulus (i.e., passer de simples bandes à une multitude de carrés) augmente le temps passé en vection et diminue le temps de latence avant

son apparition. La question du réalisme de la scène présentée a également été soulevée. Cependant, Tanahashi et collaborateurs (2007) n'observent pas de variation dans l'intensité de la vection entre le mouvement d'une scène visuelle réelle (i.e., photographie d'une pièce) et le mouvement d'un ensemble de points.

Les caractéristiques physiques du stimulus ne sont cependant pas les seules à intervenir dans la modulation de la vection reportée par les participants. L'importance des informations top-down sur la vection a été étudiée grâce au sens sémantique donné à la stimulation. Ogawa et Seno (2014) ont utilisé des objets communs mobiles (e.g., feuilles de végétaux) pour remplacer les formes géométriques (e.g., ronds ou carrés) généralement utilisées dans les stimuli en mouvement. Dans le cas d'objets mobiles, la latence de la vection augmente et sa durée diminue. La sensation de voir un objet qui tombe prend donc le dessus sur la sensation de son propre mouvement.

L'impact de la position du regard en fonction du type de mouvement a également fait l'objet d'une série d'études (e.g., Becker, Raab et Jürgens, 2002 ; De Graaf, Wertheim et Bles, 1991 ; Palmisano et Kim, 2009). Le réflexe optocinétique (i.e., réflexe de suivre du regard un objet en mouvement), a donné lieu à des hypothèses de modulation de la vection par le contrôle de l'orientation du regard. Beker et al. (2002) démontrent que dans le cas où le participant a pour consigne de fixer un point pendant la présentation du stimulus, l'intensité de la vection rapportée est supérieure à des situations de poursuite oculaire ou de suppression volontaire du réflexe optocinétique. La latence de la vection est également diminuée. De plus, la vection est reportée comme plus intense lorsque le participant doit fixer un point central que lorsque la consigne est d'effectuer une fixation périphérique (Palmisano et Kim, 2009).

Tous les déterminants de la vection présentés ci-dessus ont été répliqués plus récemment dans une série d'études utilisant différentes sortes de mouvements visuels (Keshavarz, Phillip-Muller, Hemmerich, Riecke et Campos, 2019).

D) Comment générer expérimentalement une vection ? Les effets de consignes

On entend par effet de consignes la possibilité de manipuler les attentes de l'observateur dans le but de biaiser son interprétation d'une même stimulation vers la perception soit d'un mouvement de soi soit d'un mouvement de l'environnement. Palmisano et Chan (2004) expliquent le but de l'expérience de deux manières différentes à leurs participants. Soit, ils présentent leur étude comme s'intéressant à la perception du mouvement des objets, soit,

comme portant sur les sensations de mouvement de soi illusoires. Dans la condition où les consignes dépeignent un intérêt pour le mouvement des objets, les essais sans vection sont plus nombreux que dans la condition où les consignes mettent en avant la sensation de mouvement illusoire. Toutefois, les résultats pourraient être sous-tendus par une variable confondue. En effet, les deux conditions ne se différencient pas seulement sur la verbalisation de la consigne mais également sur la possibilité, dans l'environnement physique, de se mouvoir selon la trajectoire suggérée par la stimulation visuelle en mouvement. Pour cela, une table était positionnée entre la chaise sur laquelle le sujet était assis et l'écran présentant le stimulus visuel induisant une illusion de mouvement vers l'avant. Cependant, la table était seulement présente dans la condition mouvement des objets. Ainsi, avec cette configuration, il n'est pas physiquement possible de se déplacer vers l'avant dans l'environnement réel (i.e., la table empêcherait le participant de se rapprocher réellement de l'endroit où se trouve l'écran). Le plus grand nombre d'essais sans vection dans la condition où la consigne met en avant un mouvement des objets pourrait donc être dû à la fois à l'effet de la consigne mais également à l'impossibilité de se déplacer dans l'environnement physique dans le sens du mouvement.

Par ailleurs, la modalité de réponse qui change en fonction de la condition pourrait engendrer un biais de désirabilité. En effet, dans la condition où les consignes présentent un intérêt pour le mouvement des objets, le participant doit appuyer lorsqu'ils voient les objets en mouvement et doit relâcher le bouton lorsqu'il se sent en mouvement. Dans la condition pour laquelle les consignes soulignent l'intérêt de l'expérience pour la sensation de mouvement de soi, c'est l'inverse. L'appui se fait quand la sensation de mouvement de soi apparaît et le bouton doit être relâché lorsque ce sont les objets qui sont perçus en mouvement. Le temps de vection est donc extrait du temps de relâchement du bouton en condition objet et du temps d'appui en condition mouvement de soi. Le biais de désirabilité est ici assez fort avec ces consignes. En effet, le participant peut comprendre quel type de profil de réponse est attendu (i.e., temps d'appui plus important que les temps de relâchement) et ainsi retarder ou avancer l'appui du bouton à cause d'évaluations biaisées de l'illusion. Par exemple, quand les consignes mettent en avant le mouvement des points, le participant va attendre que l'illusion de mouvement soit très prégnante avant de relâcher le bouton alors qu'il va appuyer dès la moindre sensation de mouvement dans la condition de mouvement de soi. Ce changement dans le critère de décision de ce qu'est la vection est une explication alternative à ces résultats.

D'Amour, Harris, Berti et Keshavarz (2021) dissocient la variable « consignes » de la variable « possibilité de se déplacer dans l'environnement réel » en croisant les attentes induites par la consigne et la plausibilité de l'illusion de mouvement dans l'environnement physique

réel (manipulée par la rotabilité de la chaise : chaise de bureau rotative à roulettes versus chaise fixe). Les attentes sont manipulées en présentant la prévalence de la vection dans la population générale comme forte : « la majorité des personnes (82%) qui voient cette stimulation expérimentent une forte illusion de mouvement », ou en la présentant comme faible : « peu de personnes ressentent une vection (18%) lorsque ce stimulus leur est présenté ». Dans le groupe contrôle, la vection est présentée sans a priori sur la fréquence de cette illusion. Les résultats indiquent un effet des attentes, mais uniquement sur l'intensité rapportée de la vection pour la condition dans laquelle la rotation de la chaise était physiquement possible. Cependant, le biais de désirabilité sociale lié aux consignes reste une explication alternative possible (pour une revue de la littérature sur les effets top-down sur la vection, voir Riecke, 2009).

Il est important de noter que, malgré les changements générés par les différentes variables d'intérêt, la vection reste un effet présent dans toutes ces conditions expérimentales. Ainsi, même si la latence d'entrée en vection, sa durée et son intensité rapportée peuvent varier, l'absence totale de vection est rare. Cette sensation apparaît même sans consigne ou familiarisation préalable à la stimulation (Palmisano et Chan, 2004). De surcroît, même lorsque l'environnement physique ne permet pas le déplacement (e.g., une table est placée entre l'écran et le participant ou la chaise sur laquelle le participant est assis est fixée au sol), des illusions de mouvements sont présentes (Lepecq, Giannopulu et Baudonniere, 1995 ; Palmisano et Chan, 2004).

II- Conflits sensoriels : le cas particulier de la vection circulaire en roulis

A) Les bases physiologiques à l'illusion de mouvement

Pour pouvoir comprendre comment ces illusions de mouvements sont possibles, il faut tout d'abord comprendre comment le système biologique code le mouvement réel. En effet, grâce à la compréhension des propriétés et des limites des systèmes sensoriels il est possible de prédire les sensations illusoire qui seront rapportées. Lors d'un mouvement réel, de nombreuses informations sensorielles, de nature différente mais concordantes entre elles, sont disponibles. Lorsqu'un individu se déplace physiquement, il a à sa disposition des informations visuelles, vestibulaires et proprio-somesthésiques. Cependant, grâce aux moyens de transport modernes, l'individu peut être déplacé passivement (e.g., avec un véhicule motorisé). Dans cette condition, les informations principales susceptibles de lui indiquer un déplacement sont d'origines visuelles et vestibulaires.

Lors de la présentation d'un flux visuel, deux interprétations sont possibles pour l'observateur. Soit la stimulation est interprétée comme due à un mouvement de l'environnement et l'observateur se sent immobile. Soit la stimulation est interprétée comme due au déplacement de l'observateur dans un environnement stable. L'information vestibulaire permet de dissocier ces deux perceptions. Les informations vestibulaires regroupent deux types d'informations différentes, codées par des structures distinctes : les canaux semi-circulaires et les otolithes. Les otolithes codent pour les accélérations linéaires. Les canaux semi-circulaires quant à eux, codent pour les accélérations angulaires (i.e., rotation). Le fonctionnement du système vestibulaire est plus complexe que le petit aspect qui nous intéresse ici, pour une description plus complète voir Purves et collaborateurs (2005). En présence de stimulation vestibulaire, les informations visuelles de mouvements peuvent être interprétées comme un mouvement de soi. Leur absence signale une immobilité de l'individu dans un environnement en mouvement. Le problème se pose lorsque le déplacement s'effectue à vitesse constante puisque le système vestibulaire ne code que les variations de vitesse. En effet, à vitesse constante, le mouvement de soi n'est maintenu que par les entrées visuelles. Cependant, le système otolithique même en situation d'immobilité est toujours stimulé car l'individu est soumis à la gravité, qui est une accélération linéaire. Le système otolithique, même en situation d'immobilité ou de déplacement à vitesse constante, donne en permanence une information sur l'inclinaison de la tête par rapport à la direction gravitaire.

Ces propriétés et limites du système vestibulaire peuvent amener, dans certaines situations, à un conflit sensoriel lié au fait que les stimulations dans une situation de mouvement réel et virtuel sont différentes. Par exemple, pour les vections en roulis, la rotation du flux visuel vers la droite va induire chez un observateur immobile aligné sur la gravité, une sensation de rotation vers la gauche. Cependant, dans la réalité, cette sensation de mouvement aurait dû être accompagnée d'une modification continue de la stimulation otolithique, qui correspond aux variations de position de la tête par rapport à la gravité. Dans le cas d'une stimulation visuelle engendrant une vection en roulis, ces variations de la stimulation otolithique sont absentes. Le système vestibulaire indique simplement que l'individu se tient immobile à la verticale. L'absence d'informations vestibulaires et la présence d'un flux visuel constituent un conflit sensoriel. Ce conflit visuo-vestibulaire n'existe pas pour des vections linéaires à vitesse constante.

La sensation d'un environnement en mouvement ou la sensation de déplacement illusoire peut donc résulter de la même stimulation visuelle. La vection n'est cependant pas

immédiate face au flux visuel. Une latence de 8 à 12 secondes est reportée pour passer de la perception du monde qui bouge à la perception de son propre mouvement (Brandt, Dichgans et Koenig, 1973). Le passage d'une sensation à l'autre peut se faire par une phase où la sensation de mouvement de soi est accompagnée d'une sensation de mouvement de l'environnement. Cette vection est dite partielle, c'est-à-dire que la sensation de mouvement de soi est plus lente que la vitesse de rotation du stimulus, la sensation d'un environnement en mouvement persiste alors et couvre cette différence de vitesse. Au contraire, lorsque l'individu a l'illusion de bouger face à un environnement fixe, la vection est dite saturée.

Lors de la vection en roulis, la sensation rapportée est rarement une rotation à 360 degrés, mais plutôt une sensation d'être inclinée dans le sens opposé au mouvement de la stimulation visuelle. Cependant, si seules les informations visuelles étaient prises en compte, le sujet devrait se sentir bouger dans le sens inverse du mouvement tout le long de la présentation de la stimulation visuelle en suivant une trajectoire en cercle. Au contraire, si seules les informations vestibulaires guidaient la perception, le participant ne devrait pas se sentir bouger du tout. L'illusion de pencher et non de tourner est supposée due à l'activité du système vestibulaire qui limite l'illusion de mouvement (Dichgans et Brandt, 1978). En effet, Cheung, Howard, Nedzelski et Landolt (1989) mettent en évidence que chez les patients souffrant d'une lésion bilatérale du système vestibulaire, l'expérience de vection consiste en une rotation complète et continue dans le plan parallèle à la stimulation visuelle. Ces résultats corroborent l'hypothèse d'une limitation de l'illusion de rotation chez les sujets sains par la présence d'une stimulation vestibulaire.

B) Différences inter-individuelles et conflits sensoriels

La présence du phénomène de vection peut varier au cours du temps (i.e., alternation de phases de perception de mouvement de soi avec des phases de perception d'un mouvement de l'environnement). Son intensité peut également varier d'un individu à l'autre. La question des différences inter-individuelles dans le poids attribué aux différentes informations sensorielles dans une situation naturelle, sans perturbation, est peut-être un moyen de mieux comprendre les différences inter-individuelles dans la vection reportée. Un exemple de différence inter-individuelle de traitement de l'information est la « dépendance à l'égard du champ visuel ». Pour coder la position de son corps dans l'espace, deux types d'informations sont pertinentes. Les premières proviennent d'indices externes acquis visuellement (e.g., les objets immobiles et verticaux comme les immeubles) et les secondes sont des indices internes (e.g., vestibulaires et

proprioceptifs). Palmisano, Apthorp, Seno et Stapley (2013) supposent que l'importance des informations visuelles dans le maintien de la posture pourrait prédire les différences de report de la vection. Autrement dit, plus la personne s'appuie sur la vision pour maintenir sa posture plus elle rapportera de vection face à la stimulation visuelle en mouvement uniforme. Afin de quantifier l'importance de la vision dans le maintien de la posture, les auteurs comparent la longueur parcourue par le centre de pression sous les pieds en condition de maintien de la posture debout yeux ouverts par rapport à une condition debout yeux fermés (ce rapport est appelé coefficient de Romberg). Plus le chemin parcouru par le centre de pression sous les pieds est long lors du maintien de la position debout les yeux fermés par rapport au maintien de cette même position les yeux ouverts, plus l'information visuelle est utilisée par l'individu pour se stabiliser (i.e., plus le coefficient de Romberg est grand). En effet, lorsque l'information visuelle n'est plus présente, les oscillations posturales sont plus importantes et donc le déplacement du centre de pression sous les pieds est plus grand. Les résultats montrent que le coefficient de Romberg prédit la force reportée de la vection linéaire, dans le sens où les individus se basant plus sur la vision pour maintenir leur posture (i.e., coefficient de Romberg important, c'est-à-dire un chemin plus long les yeux fermés que les yeux ouverts) rapportent des illusions de mouvement plus fortes que ceux ayant un coefficient de Romberg bas et donc pour lesquels la vision est moins centrale dans la stabilisation posturale.

Cependant, lorsque des oscillations en roulis sont ajoutées à la stimulation linéaire, le coefficient de Romberg ne prédit plus la force de la vection dans le sens attendu. Les auteurs avaient émis l'hypothèse que les individus ayant un coefficient de Romberg élevé seront moins sensibles au conflit sensoriel ajouté par les oscillations en roulis. Ces individus qui accordent un poids plus élevé aux informations visuelles que vestibulaires devraient reporter une illusion de mouvement plus forte. Il est même supposé que les individus accordant un poids plus important aux informations vestibulaires devraient rapporter moins de vection. Ainsi, avec ce raisonnement, plus le coefficient de Romberg est élevé plus l'illusion de mouvement reportée devrait être importante. Cependant, les résultats suggèrent la relation inverse avec l'observation d'une corrélation négative qui indique une vection reportée plus forte pour les individus attribuant un poids plus important aux informations vestibulaires. Ainsi, les individus qui seraient plus susceptibles d'être exposés à un fort conflit sensoriel seraient également ceux reportant le plus de vection. Cet état de fait est assez contre-intuitif et va même à l'encontre du modèle du conflit visuo-vestibulaire qui prédit une diminution de la vection quand le conflit est présent et intense et une augmentation de la vection lorsque ce conflit est minimisé. Ce résultat avait été mis en évidence dans plusieurs études qui démontraient une augmentation de la vection

lors de l'ajout d'une oscillation, et donc d'un conflit, dans la stimulation générant une vection linéaire (Palmisano, Gillam et Blackburn, 2000 ; Palmisano, Burke et Allison, 2003). Cependant, Tanahashi, Ujike et Ukai (2012) ont observé une augmentation de la vection reportée en présence de ce conflit visuo-vestibulaire comparativement à une situation dans laquelle ce conflit n'était pas présent. Il semblerait donc que le conflit visuo-vestibulaire ait un rôle important dans la vection, au moins au niveau de l'intensité reportée.

Dans la littérature, certaines données suggèrent que les informations visuelles auraient un effet de modulation de l'activation des régions cérébrales impliquées dans le traitement des informations vestibulaires (Indovina, Maffei, Bosco, Zago, Macaluso et Lacquaniti, 2005). Les résultats observés sont interprétés comme la preuve d'un codage prédictif des changements gravitaires attendus lors de la perception d'une accélération du flux visuel. Plus largement, une relation inhibitrice réciproque est supposée entre une partie de l'insula (active durant les stimulations vestibulaires caloriques) et le cortex occipital (actif pendant la présentation visuelle de stimuli), qui sous-tendrait la repondération des informations sensorielles et permettrait la vection (Brandt, Bartenstein, Janek et Dieterich, 1998). Cette inhibition permettrait de donner un poids plus fort au système sensoriel codant pour le mouvement de soi (que ce soit le système visuel ou vestibulaire). Les données disponibles en électro-encéphalographie suggèrent que cette inhibition s'exprime par une augmentation de l'activité alpha dans les zones cérébrales pariéto-centrales (Harquel, Guerraz, Barraud et Cian, 2020). Cette étude met également en évidence une corrélation positive entre l'intensité de l'activité alpha et l'intensité de la vection. La modulation des oscillations alpha pourrait à la fois permettre une mesure objective de la vection et rendre compte des différences inter-individuelles dans le report de la vection.

III- L'hypothèse d'un partage de processus d'orientation spatiale entre mémoire épisodique et vection

Le traitement spatial de la position du corps dans l'espace est présent pendant la vection. Il devient intéressant de combiner la vection avec une tâche de mémoire épisodique pour évaluer l'implication d'un traitement spatial pendant la remémoration. L'hypothèse suivrait alors le même raisonnement que dans toutes les expériences de double tâche présentées jusque-là, à savoir que lorsque deux tâches différentes utilisent le même processus (ou les mêmes ressources), il est possible d'observer une interférence.

A) La mise à jour de son orientation dans l'espace grâce à la vection en lacet

L'illusion de mouvement partage-t-elle des propriétés similaires au mouvement réel en termes de traitement de l'orientation de l'individu dans l'espace ? Comme abordé dans le Chapitre 1, lors d'un mouvement réel, la position de l'individu dans l'espace est mise à jour automatiquement (Farell et Robertson, 1998). Lors d'une rotation, le point de vue est actualisé, et ce même si l'information visuelle n'est pas disponible. Riecke, Feuereissen, Rieser et McNamara (2015) émettent l'hypothèse qu'un mouvement illusoire induit par des indices sonores (i.e., un son se déplaçant autour du sujet) et biomécaniques (i.e., mouvement des pieds sur un tapis en rotation sans changement d'orientation du participant dans l'espace) faciliterait la perception de l'orientation du sujet dans l'espace et aiderait à la précision du pointage d'objets. Autrement dit, une illusion de mouvement pourrait mener à des résultats similaires au mouvement réel. Les auteurs s'attendent cependant à ce que la condition de vection ne soit pas aussi profitable à l'actualisation du point de vue que le mouvement réel (i.e., le participant reste assis sur la chaise et fait des pas de côté pour accompagner la rotation réelle de la chaise par l'expérimentateur). Une tâche de pointage est donc demandée au participant après une rotation imaginée, une rotation en vection ou une rotation réelle. Les résultats indiquent que les erreurs de pointage sont plus importantes en condition imaginée qu'en condition de vection. La vection apporterait donc les informations nécessaires à l'actualisation de l'orientation dans l'espace. Les erreurs de pointage ne sont pas différentes entre les conditions de vection et de déplacement réel. Ce résultat suggère que le déplacement illusoire généré par la vection engendrerait une modification de la représentation du point de vue auquel le participant fait face de manière similaire à un déplacement réel.

Il faut néanmoins souligner que les auteurs ont ajouté un mouvement réel des jambes du participant dans la situation de vection (sans déplacement et donc sans changement d'orientation géographique) ce qui réduit la différence entre les conditions de vection et de mouvement réel. Il est donc nécessaire de distinguer ici mouvement (i.e., activité physique des membres) et déplacement (i.e., changement d'orientation géographique), ce qui dans le cas des membres inférieurs est assez rare en situation écologique (activité physique sans modification de l'orientation géographique). Le mouvement des jambes a été ajouté à la stimulation sonore car le son en mouvement (vection auditive) ne produisait pas, à lui seul, la sensation illusoire de rotation de manière suffisamment fiable d'un essai à un autre ni ne le produisait chez tous les individus. Le mouvement des jambes sur un tapis en rotation est connu pour induire une

vection dite biomécanique. Ici, les auteurs utilisent une stimulation biomécanico-auditive pour potentialiser l'intensité de la vection. Cependant, ce type de vection nécessite un mouvement physique qui pourrait être à l'origine de la mise à jour de l'orientation géographique de l'individu. Pour distinguer l'apport du mouvement réel et de la vection sur la mise à jour de l'orientation géographique, une condition de mouvement des jambes sans rotation du tapis aurait été nécessaire. Cela aurait également permis d'appréhender plus précisément l'équivalence de la mise à jour du point de vue entre vection et déplacement réel.

Une réplique de la condition « ignorée » (i.e., le participant se déplace et son point de vue change mais il doit pointer les objets comme s'il n'avait pas bougé, Farrell et Robertson, 1998) lors de la présentation d'un stimulus auditif engendrant une illusion de mouvement de soi pourrait renseigner sur l'automatisme de la mise à jour du point de vue en vection. Cette question de l'automatisme permettrait, elle aussi, de mieux appréhender les points communs et les différences de la vection et du déplacement réel dans cette tâche d'orientation spatiale. En effet, dans cette expérience, la vection aide à la réalisation de la tâche, car le participant a l'illusion de tourner vers le point de vue à partir duquel la tâche doit être réalisée. Si lorsque le mouvement réel doit être ignoré les performances de pointage diminuent, qu'en est-il des performances lorsque la vection doit être ignorée ? Si la vection met à jour le point de vue d'une manière automatique, d'autres questions pourraient être adressées par la suite, notamment des situations dans lesquels la vection n'aiderait pas à la réalisation de la tâche. Si la simulation du déplacement vers le point de vue à imaginer est effectuée mentalement par le chemin le plus court, il est possible d'envisager que la vection engendre une perturbation de la mise à jour de l'orientation géographique lorsque le mouvement illusoire est généré dans le sens inverse de cette simulation mentale. De plus amples études seront nécessaires afin de préciser les conditions selon lesquelles la vection procure un avantage ou un désavantage dans des tâches d'orientation spatiale. Ces résultats expérimentaux s'inscrivent et s'inscriraient dans un champ de recherche encore peu exploité, à savoir la compréhension de la significativité fonctionnelle de la vection. Palmisano et collaborateurs (2015) proposent une revue rapide des théories fonctionnelles existantes de la vection et labellisent cette question de recherche comme un défi futur à relever dans le domaine de la compréhension de la vection.

En résumé, d'une manière similaire à un déplacement réel, la vection permet la mise à jour du point de vue. Les résultats de cette étude vont donc dans le sens d'un traitement de l'orientation géographique durant la vection même si les processus mis en jeu lors de cette mise à jour ne sont pas encore complètement compris.

B) Modification de l'orientation spatiale grâce à la vection en roulis

L'orientation spatiale est définie comme la perception qu'a l'individu de la position de son propre corps par rapport à un cadre de référence (Young, 2003). Ce cadre de référence est le plus souvent la surface de la terre et de manière générale le référentiel gravitaire. Il est donc nécessaire de différencier l'orientation spatiale de l'orientation géographique (e.g., utilisé dans une tâche de navigation). Cette dernière consiste en un traitement de la localisation de l'individu au sein du cadre de référence. Une désorientation dite géographique est donc la perte du codage de la localisation de son propre corps dans l'environnement et est à l'origine de la sensation de s'être perdu (dans une ville par exemple), accompagnée de l'impossibilité de naviguer efficacement jusqu'à un autre point défini dans l'environnement. C'est de ce type d'orientation dont il a été question jusqu'à présent (notamment lors de modifications du point de vue suite à une rotation). La désorientation spatiale, par contre, fait référence à la perte de correspondance entre position réelle du corps et position ressentie. Par exemple, l'individu peut se sentir pencher, la tête en bas ou encore tourner alors que ce n'est pas le cas dans la réalité. Cet état de désorientation spatiale peut engendrer une désorientation géographique de par les erreurs qu'elle engendre en termes de sensation de direction ou de sensation de mouvements. La perturbation de l'orientation spatiale est donc par définition une des conséquences de la présentation d'un flux visuel uniforme dans une grande partie du champ visuel, notamment dans le cas de la vection en tangage ou en roulis.

Si le report subjectif des sensations accompagnant la stimulation visuelle est une mesure couramment utilisée, un pan de la littérature s'est intéressé aux mesures comportementales objectives de la dissociation entre orientation spatiale réelle et perçue (présente lors de la vection). Thilo et Gresty (2002) ont par exemple démontré que la présentation d'une stimulation visuelle en mouvement avait un effet sur la perception de la verticale. Assis dans un simulateur effectuant des mouvements réels d'oscillation de droite à gauche, les participants voyaient soit un environnement visuel en rotation continue (le mouvement présenté visuellement est différent du mouvement réel) soit un environnement visuel fixe. Les participants devaient indiquer grâce à une manette de réponse chaque fois qu'ils se sentaient assis à la verticale (i.e., lorsque l'angle d'oscillation du simulateur passe par zéro degré). Une autre manette leur permettait d'indiquer lorsqu'ils ressentaient une illusion de mouvement, en opposition aux moments pendant lesquels ils se sentaient immobile face au flux visuel. Les résultats montrent une déviation de la verticale dans le sens du mouvement visuel (e.g., lors du mouvement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre la baguette est ajustée inclinée vers la gauche), alors qu'en l'absence de

mouvement (i.e., présentation d'une image fixe) la verticale est très bien estimée (moins d'un degré d'inclinaison).

Cependant, le report d'une sensation d'inclinaison ou d'une sensation de l'environnement en mouvement n'a aucun effet significatif sur la déviation de la verticale, c'est-à-dire que l'état subjectif rapporté par le participant pendant la tâche n'a pas d'effet significatif sur le biais de verticalité. Autrement dit, même lorsque le participant ne rapporte aucune illusion de mouvement, le biais observé sur le jugement de verticalité est présent. Ainsi, il s'agirait donc davantage d'un effet du traitement de l'information visuelle en mouvement que de l'effet d'une perception de mouvement de soi illusoire (autrement dit un effet de lavection en tant que telle). Les auteurs interprètent ce résultat comme concordant avec les études neurobiologiques qui dissocient lavection circulaire en roulis (qui est une sensation) du codage de l'inclinaison réelle. En effet, le mouvement de rotation visuel qui génère une réorientation dynamique et continue du corps dans l'espace module la réponse des neurones vestibulaires. Cette modulation serait donc indépendante du report conscient de lavection. Ainsi, le traitement spatial serait présent pendant toute la durée de la stimulation (i.e., traitement continu).

Les auteurs démontrent également qu'il est possible d'amplifier cet effet en jouant sur la pondération des informations sensorielles. Alors que les informations visuelles peuvent être interprétées comme un mouvement de soi, les informations vestibulaires, elles, indiquent une immobilité du corps dans l'espace (pas de mouvement de la tête par rapport à la gravité). Il est possible de modifier la précision perçue d'une information sensorielle en diminuant le niveau signal sur bruit. Dans cette expérience, afin d'augmenter le bruit associé aux informations vestibulaires et somesthésiques, et d'en diminuer la pertinence dans l'intégration multimodale, une vibration du siège est appliquée pendant la présentation du mouvement dans le champ visuel. Ainsi, les informations visuelles ont un poids plus important que les informations vestibulaires dans la construction du percept car elles sont évaluées comme étant moins bruitées. Les résultats montrent que la déviation de la verticale dans le sens du mouvement visuel est plus importante dans la situation avec une vibration du siège que sans vibration du siège.

Laboissière, Barraud et Cian (2017) répliquent cette déviation de la verticale lors de la présentation d'un mouvement dans le champ visuel et vont plus loin en démontrant que lavection en roulis a un impact sur le jugement de situation de déséquilibre des objets, ce qui est en faveur d'un effet de lavection sur la perception de la gravité. Si lavection en roulis modifie la perception de la direction gravitaire alors elle devrait perturber le jugement d'équilibre des objets. Ainsi, pour un mouvement présenté vers la droite, la verticale perçue dévie vers la droite.

Donc, lorsque les objets sont présentés penchés vers la droite il en résulte une surestimation de leur stabilité (comme s'ils étaient moins penchés qu'ils ne le sont réellement). L'effet s'inverse lorsque les objets sont présentés penchant vers la gauche. L'inclinaison perçue de la gravité, dans le sens opposé à l'inclinaison de l'objet engendre une surestimation de l'inclinaison de l'objet, une sous-estimation de sa stabilité et donc une surestimation du risque de chute.

Grâce à une tâche d'ajustement d'une baguette à la verticale, il est possible d'accéder à l'orientation spatiale perçue du corps du participant. Les résultats expérimentaux démontrent une déviation de la verticale dans le sens du mouvement ce qui suggère une modification de l'orientation spatiale face à lavection en roulis. Ce traitement spatial de l'orientation s'effectue pendant la présentation de l'environnement visuel en mouvement et semble être présent même en l'absence de report de l'illusion de mouvement de soi.

C) Perturbation posturale lors d'une stimulation en mouvement uniforme

Lavection engendrant une modification de la direction gravitaire perçue, il est intéressant de se questionner sur l'impact qu'elle pourrait avoir sur la posture. En effet, la posture nécessite un ajustement permanent par rapport à la direction gravitaire, afin de maintenir son équilibre, il paraît pertinent de rechercher, dans le signal postural, une signature particulière de lavection. Si lavection a un impact sur la posture qui lui est propre, il sera alors possible d'envisager de remplacer l'évaluation subjective qui suit la stimulation par une mesure continue et en temps réel de lavection.

Tanahashi, Ujike, Kozawa et Ukai (2007) ont montré un lien entre la présentation d'une stimulation en mouvement angulaire uniforme (i.e., rotation de l'ensemble de l'environnement à vitesse constante) et certains paramètres posturaux. Les participants se tenaient face à un écran sur lequel était présenté un flux visuel pouvant générer unevection en roulis. La tâche du participant consistait à appuyer sur un bouton lorsqu'une sensation de mouvement était ressentie et le relâcher lorsque la sensation disparaissait. La position moyenne du centre de pression sous les pieds est décalée dans le sens du mouvement visuel (donc sur l'axe médio-latéral). Ce décalage est plus grand lorsque le sujet se perçoit en mouvement (vection) par rapport aux moments où il perçoit le mouvement de l'environnement. La variance augmente également en présence d'une information visuelle en mouvement et ce d'autant plus lorsque lavection est présente. Ainsi, un environnement visuel en mouvement uniforme induit des modifications posturales qui sont amplifiées lors de lavection. Il semble donc difficile d'évaluer

la présence d'une vection sur la seule base des modifications posturales en l'absence d'un report subjectif.

Horiuchi, Imanaka et Ishihara (2021) mesurent la posture pendant l'exposition à une stimulation pouvant générer une vection en tangage. Aucune corrélation entre la vection auto-reportée et la déviation posturale n'est mise en évidence. Cependant, les résultats démontrent une augmentation de l'amplitude des oscillations posturales sur l'axe antéro-postérieur lors de la présence de la stimulation visuelle (présentant des points suivant un mouvement d'avant en arrière puis d'arrière en avant). Pour quelques participants, il est possible de mesurer un lien direct entre la vection reportée et une modification de la posture, la question du critère de décision du report de la vection se pose alors. Les auteurs émettent l'hypothèse que les participants pourraient reporter de la vection quand ils se sentent réellement inclinés. Au regard des différences inter-individuelles importantes dans le report de la vection, les auteurs émettent déjà l'hypothèse que les participants pourraient conceptualiser la vection différemment. Ce lien direct entre vection reportée et posture a cependant été mis en évidence par Kuno, Kawakita, Kawakami, Miyake et Watanabe (1999). Il faut néanmoins insister sur quelques caractéristiques qui lui sont propres : les participants se tiennent en Romberg et la posture est évaluée à l'aide de capteurs positionnés sur la tête, les hanches, les genoux et les chevilles du participant et non avec des capteurs de pression. Ils utilisent de plus un dispositif de réalité virtuelle pour présenter les points en mouvement et non un écran.

La question du lien entre posture et vection a parfois été abordée sous l'angle d'un partage d'informations visuelles. Ainsi, l'objectif est de déterminer si le processus à la base de la régulation posturale grâce à la vision est également à l'origine de la vection. Les résultats exposés précédemment tendent à montrer que la vection n'est pas induite par le même processus que celui régulant le contrôle postural grâce à la vision, car la modulation de la posture par des stimulations visuelles en mouvement semble indépendante du report subjectif d'une sensation illusoire de mouvement de soi. Guerraz et Bronstein (2008) supposent cependant que deux mécanismes différents sont à l'œuvre lors de la réponse posturale. Un premier processus interviendrait très rapidement après le début de la stimulation visuelle et émettrait une réponse posturale automatique d'ajustement au flux visuel. Un second processus interviendrait dans un délai plus long suite à la perception consciente de la vection. La réponse posturale serait la même que celle amorcée par le processus automatique, mais de plus grande ampleur.

En résumé, l'information visuelle de mouvement influence le traitement de l'orientation spatiale dont on peut voir la signature grâce aux modifications des paramètres posturaux. Ainsi,

la variation de ces paramètres attesterait dans une situation expérimentale donnée de la modulation de la prise en compte des informations visuelles dans le processus d'orientation. Si les flux visuels susceptibles d'induire une vection ont bien un effet sur la posture, il est difficile de séparer les modifications posturales propres à la vection des effets du mouvement visuel en absence d'illusion. Les données en imagerie cérébrale et ces données comportementales suggèrent que même en l'absence de report subjectif un traitement de l'orientation spatiale a lieu pendant la présentation d'un flux visuel continu (vection linéaire ou circulaire). La déviation posturale dans le sens du mouvement indique des erreurs de perception de la verticale gravitaire indépendamment de la sensation consciente, mais illusoire, d'une inclinaison.

D) Choix de la vection en roulis et objectif des expériences

Le but des trois expériences de ce chapitre sera donc d'étudier le partage de processus entre la mémoire épisodique et le traitement spatial de notre orientation. Il s'agit de démontrer l'utilisation d'un processus d'orientation spatiale lors de la remémoration épisodique. Nous utiliserons dans les expériences qui suivent la situation de double tâche posture-cognition, déjà utilisée dans le chapitre précédent. Il s'agit ici d'augmenter les contraintes posturales (quelle que soit la position, assise ou debout) via une stimulation visuelle en mouvement induisant une désorientation spatiale. En effet, si la situation assise est considérée, dans la littérature, comme une situation de simple tâche, un maintien de l'équilibre pour se maintenir à la verticale est indispensable. La double tâche a été définie dans le chapitre précédent comme une situation dans laquelle deux tâches, ayant chacune un objectif propre, sont réalisées en parallèle. Le maintien de son corps à la verticale (perturbé par la vection) et le rappel de source peuvent être considérés comme deux activités ayant des objectifs distincts, ainsi, leur réalisation en parallèle est donc une situation de double tâche. Le choix s'est porté sur la vection en roulis qui induit une dissociation entre la position réelle de la personne dans l'espace et la position ressentie, ce qui peut perturber la gestion de l'équilibre. Cette différence entre la localisation réelle du sujet et la localisation d'intérêt pour réussir la tâche est également présente lors de la remémoration épisodique. En effet, la mémoire épisodique est définie comme une capacité à voyager mentalement dans le temps et dans l'espace. Il s'agit donc de se percevoir à un autre endroit dans l'espace (i.e., le contexte spatial du souvenir) que celui actuellement expérimenté. Ainsi, à la fois dans la vection et la remémoration épisodique, il y a une modification de notre position perçue (lieu du souvenir dans le cas de la remémoration et inclinaison du corps dans le cas de la vection) par rapport à notre position réelle dans l'espace. Cette nécessité d'un traitement

spatial dans ces deux tâches pourrait générer des interférences entre vection et remémoration épisodique lorsqu'elles sont effectuées en parallèle.

Afin de dissocier des effets globaux de double tâche du partage de processus qui nous intéresse, nous comparerons dans les expériences qui suivent une tâche de mémoire épisodique avec une tâche de mémoire sémantique. Contrairement à la mémoire épisodique, la mémoire sémantique ne nécessite pas de référence à un moment précis dans l'espace et dans le passé. Ainsi, aucune interférence n'est attendue avec la situation de perturbation de l'orientation dans l'espace. La réalisation de la tâche sémantique ne nécessitant pas de processus spatial d'orientation, sa réalisation face à un environnement visuel en mouvement uniforme ne devrait pas plus impacter les performances comparativement à une situation ne générant pas de vection. Ainsi, l'hypothèse principale des expériences suivantes est qu'il existe une interférence entre vection et tâche mnésique, spécifique à la remémoration épisodique.

En premier lieu, nous avons testé la vection en position assise, avec l'hypothèse que nous observerons un effet sur les performances mnésiques, plus spécifiquement sur le taux de bonnes réponses à la tâche de remémoration épisodique (Expérience 3). Le processus d'orientation spatial étant sollicité plus fortement pendant la vection que lors d'une situation sans mouvement, à cause de l'illusion de mouvement qui dissocie la position réelle et la position ressentie, il ne pourrait pas être aussi efficacement mobilisé pour la remémoration. La position debout a ensuite été privilégiée car elle permet une estimation du traitement spatial d'orientation sans réponse subjective de la part du participant. Enfin, une condition de mouvement non uniforme remplacera la condition statique pour évaluer l'impact du mouvement visuel n'engendrant pas de dissociation entre position réelle et perçue sur les performances mnésiques (Expériences 4 et 5).

IV- Introduction générale aux Expériences 3 ; 4 et 5

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer l'interaction entre vection et cognition. Au sein de chaque hypothèse, des prédictions sont faites sur la vection ou sur les performances à la tâche cognitive. Les données de la littérature répondent donc soit à la question « l'illusion de mouvement est-elle affectée par la réalisation d'une tâche cognitive ? » soit à la question « la réalisation de la tâche cognitive est-elle perturbée par la vection ? ».

A) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? L'hypothèse d'un partage de ressources attentionnelles globales

Une des hypothèses théoriques avancée dans la littérature consiste à supposer que l'interférence mesurée entre tâche cognitive et vection est due à un partage global de ressources attentionnelles et à une augmentation de la charge cognitive dans cette situation de double tâche. Dans ce cas, la nature de la tâche et les processus cognitifs nécessaires à sa réalisation n'ont aucune importance dans la prédiction de l'interférence. Kitazaki et Sato (2003) démontrent par exemple que la vection est liée à l'orientation de l'attention. En effet, la vection est produite par le mouvement des points sur lesquels l'attention n'est pas portée. Dans leur expérience, le participant se tient face à trois écrans (i.e., un en face, un à sa droite et un à sa gauche) sur lesquels apparaissent des points de couleurs, verts ou rouges, se déplaçant les uns vers le haut, les autres vers le bas. Le participant a pour consigne de porter attention aux points dont la couleur est inscrite à l'écran au début de l'essai. Les résultats concernant l'auto-report de la vection indiquent que se sont le plus souvent les points sur lesquels l'attention n'est pas portée qui génèrent cette sensation de mouvement illusoire. Ainsi, les auteurs concluent que l'attention peut moduler le phénomène de vection.

Seno, Ito et Sunaga (2011), postulent alors qu'une tâche cognitive pourrait avoir cet effet de retrait de l'attention du stimulus en mouvement, car elle serait orientée vers la résolution de la tâche cognitive, et par ce biais augmenter la vection pendant la résolution de cette tâche. Ils étudient donc l'effet de la charge cognitive sur la vection en augmentant la difficulté de la tâche cognitive et l'effet de l'attention sur la vection en comparant une situation de simple tâche (report de la vection uniquement) et une situation de double tâche (ajout d'une tâche cognitive). Deux tâches cognitives sont utilisées. La première est une tâche pour laquelle le participant a pour consigne de compter le nombre de présentations d'une lettre cible lors d'une présentation visuelle séquentielle de lettres au centre de l'écran à une fréquence 4 ou 8 Hertz. Les résultats ne mettent en lumière aucun effet significatif de l'ajout de cette tâche ou de sa difficulté sur la latence d'entrée en vection ni sur le pourcentage de temps passé en vection pendant l'essai. Cependant, sur l'échelle auto-rapportée, l'intensité de la vection est plus forte en situation de simple tâche (i.e., regarder passivement les suites de lettres) qu'en situation de double tâche. La deuxième tâche cognitive utilisée est une tâche de poursuite de plusieurs objets en mouvement (en région fovéale, ne nécessitant pas de mouvement oculaire). Le nombre d'objets à suivre varie afin d'augmenter la difficulté de la tâche et donc la charge cognitive. Les résultats montrent que cette seconde tâche a un effet sur plusieurs indicateurs de la vection. En effet, la

latence d'entrée en vection augmente et la durée totale de la vection diminue et ce d'autant plus que la difficulté de la tâche augmente. Les auteurs concluent donc à une importance des ressources attentionnelles spatiales pour la vection.

Les résultats mettent cependant en évidence un effet différentiel des deux tâches utilisées sur la vection alors qu'elles ont toutes deux des composantes spatiales. En effet, ces tâches ont été choisies en raison des effets d'interférence avec des processus spatiaux déjà mis en évidence dans la littérature (Seno et collaborateurs, 2011). La tâche de présentation visuelle rapide et sérielle dégrade les performances aux tâches de discrimination d'orientation effectuées en parallèle. Quant à la tâche de poursuite d'objets, il a été mis en évidence qu'elle était réalisée grâce à des processus de perception du mouvement. Ainsi, la vection pourrait interférer principalement avec des tâches spatiales faisant appel à un traitement du mouvement ou de son orientation dans l'espace comparativement à des tâches cognitives de difficulté équivalente faisant appel à des processus spatiaux mais indépendants de l'orientation spatiale.

Cette hypothèse de partage de ressources globales propose une explication des résultats de modulation de la vection entre une situation de simple tâche et une situation de double tâche. Dans la mise en place d'un paradigme expérimental associant vection et tâche cognitive la comparaison de plusieurs situations de double tâche sera nécessaire pour écarter l'explication d'un impact attentionnel global. Par ailleurs, dans ces deux expériences, les auteurs ont utilisé des mouvements linéaires le long de l'axe longitudinal (i.e., mouvement du haut vers le bas ou inversement). Dans ce type de vection, il n'y a pas de conflit visuo-vestibulaire car un déplacement en ligne droite à vitesse constante ne modifie pas notre position par rapport à la gravité. Les différents systèmes sensoriels ne transmettent pas d'informations contradictoires sur la position du corps dans l'espace. Les prédictions expérimentales de l'interférence entre la vection et les tâches cognitives peuvent varier en fonction de la présence ou non d'un conflit sensoriel engendré par le flux visuel, et donc de la présence ou non d'une incompatibilité entre l'orientation spatiale réelle et celle perçue (i.e., désorientation spatiale).

Si détacher l'attention des points en mouvement génère une augmentation de la vection mais que l'ajout d'une tâche cognitive la détériore, la tâche cognitive peut donc difficilement être considérée uniquement comme une charge mentale ou comme générant un retrait attentionnel de la stimulation visuelle. Il semble alors nécessaire de se questionner sur un partage de processus entre vection et résolution de la tâche cognitive.

B) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? L'hypothèse d'un partage de ressources spatiales

Ehrenfried, Guerraz, Thilo, Yardley et Gresty (2003) testent donc l'hypothèse d'une spécificité de l'interférence de la vection avec des tâches cognitives spatiales. Ainsi, ils comparent deux situations de double tâche, une impliquant une tâche cognitive spatiale et l'autre une tâche cognitive verbale, avec une situation de simple tâche (i.e., sans tâche cognitive, avec seulement une cotation de la vection). L'hypothèse d'un partage de ressources spécifiquement spatiales prédit une interférence de la vection avec la tâche spatiale mais pas avec la tâche verbale. Autrement dit, entre la situation de simple tâche (i.e., report de la vection uniquement) et la double tâche vection et tâche cognitive verbale aucune différence n'est attendue, contrairement à ce que prédirait l'hypothèse de partage de ressources globales. Les résultats montrent que lors de l'ajout de l'environnement visuel en mouvement générant une vection linéaire, les performances aux deux tâches diminuent significativement. Cependant, il n'y a pas de différence entre la tâche verbale et la tâche spatiale. Les auteurs concluent donc que ces résultats sont en faveur d'un impact du mouvement uniforme sur les ressources attentionnelles et exécutives générales. Les matrices de Brooks utilisées dans cette étude ont les mêmes limites que celles évoquées au Chapitre 2. De nouveau, le choix d'une vection linéaire ne permet pas de perturber le traitement spatial de son orientation dans l'espace comme le ferait une vection circulaire en roulis par exemple (i.e., disparité entre l'orientation réelle et perçue).

Peu d'études explorent la relation entre un traitement cognitif nécessaire à la réalisation d'une tâche spatiale et le traitement spatial induit par la vection. La question généralement soulevée dans la littérature est un peu différente. En effet, le but est souvent tourné vers l'augmentation de la sensation de mouvement de soi, notamment dans des conditions de réalité virtuelle, avec l'idée que l'expérience d'immersion en sera améliorée (Riecke, Pelkum, Caniard et Bühlhoff, 2005 ; Riecke, Schulte-Pelkum, Avraamides, Von Der Heyde et Bühlhoff, 2006 ; Trutoiu, Mohler, Schulte-Pelkum et Bühlhoff, 2008). Ainsi, l'étude des caractéristiques situationnelles engendrant une vection plus ou moins intense tient une grande place dans la littérature, avec un intérêt renouvelé pour les reports subjectifs.

C) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? Une question souvent posée en termes de compatibilité d'informations

Si la vection peut engendrer une modification des sensations corporelles, l'inverse est-il possible ? De plus, comme présenté plus haut dans ce chapitre, l'état mental du participant

peut jouer sur l'illusion de mouvement (e.g., attentes, connaissances antérieures, consignes...), mais qu'en est-il de l'état physique ? Mori et Seno (2018) proposent d'effectuer en parallèle de la vection, et de son report grâce à un bouton réponse, une saisie d'objet de la main gauche. La vection est reportée moins forte, apparaît avec une latence plus importante, et sa durée est amoindrie lors de la présence d'une saisie d'objet. Les auteurs concluent que cet effet pourrait être dû à un effet de la demande attentionnelle globale mais qu'il est possible d'interpréter ces résultats comme une conséquence d'un traitement des informations proprioceptives. En effet, le processus d'intégration des informations sensorielles les pondère en fonction de leur pertinence mais également de leur niveau de bruit (les différents systèmes sensoriels donnent ici des informations contradictoires quant à l'immobilité ou au mouvement du corps). Donner un poids plus fort à la proprioception par la saisie d'un objet pourrait générer un basculement de la perception du mouvement de soi vers l'immobilité. L'état corporel et la vection seraient donc liés. La question de l'influence des tâches cognitives impliquant des composantes sensori-motrices sur la vection est donc ouverte.

Miles, Karpinska, Lumsden et Macrae (2010), s'intéressent à l'incarnation de la cognition, et essaye de démontrer, en jouant sur l'illusion de mouvement, que l'état du corps (modifié grâce à une vection) peut jouer sur la cognition. Les auteurs conçoivent la mémoire comme un voyage mental dans le temps et se positionnent donc dans le cadre théorique d'un ancrage sensori-moteur des tâches de mémoire (i.e., projection dans le passé) et de prospection (i.e., projection dans le futur). Ils supposent que si l'état du corps peut avoir une influence sur la cognition (et notamment le voyage mental dans le temps), la représentation métaphorique du temps, avec le futur se situant devant nous et le passé derrière nous, prédit une relation entre le mouvement vers l'avant et le futur et entre le mouvement vers l'arrière et le passé. Ainsi, les participants sont installés face à un écran présentant un flux de points se déplaçant soit des extrémités de l'écran vers le centre (déplacement des points vers l'avant, illusion de mouvement vers l'arrière) soit du centre vers les bords (déplacement des points vers l'arrière, illusion de mouvement vers l'avant). Pendant la stimulation visuelle, une tâche de détection de cibles comportant de nombreux distracteurs et seulement cinq pour cent de cibles à détecter, entraîne un détachement attentionnel de la tâche et l'apparition de pensées parasites (*daydream*, c'est-à-dire que l'esprit du participant vagabonde). Ce sont à ces pensées non reliées à la tâche que s'intéressent les auteurs dans un questionnaire post-tâche. Les participants doivent ajuster un curseur pour définir si leurs pensées étaient plus orientées vers le passé ou le futur. Ce même curseur est utilisé dans un deuxième temps pour indiquer la proportion de temps passé à se focaliser sur la tâche ou sur ses autres pensées. Les résultats mettent en évidence une proportion

plus importante de pensées orientées vers le passé quand l'illusion de mouvement est vers l'arrière et plus de pensées orientées vers le futur quand l'illusion de mouvement est vers l'avant.

Ce raisonnement de cognition incarnée n'a pas été appliqué uniquement au voyage mental dans le temps et par extension à la mémoire épisodique. En effet, il suppose un ancrage sensori-moteur de l'ensemble des tâches cognitives. Celles-ci seraient donc sensibles à la manipulation de l'état corporel. Par exemple, des tâches impliquant des nombres (i.e., calculs, génération de nombres...) ont également été utilisées, avec l'idée que les nombres s'organisent le long d'une ligne mentale qui a donc un sens, une orientation (i.e., les plus petits chiffres vers la gauche ou derrière soi et les plus grands vers la droite ou devant soi). Ainsi, l'hypothèse est que l'état du corps, ici l'illusion d'avancer ou de reculer modifie l'accès aux nombres (Seno, Taya, Ito et Sunaga, 2011). Cet effet de congruence entre la représentation orientée d'un concept et le sens de lavection a également été largement étudié dans le domaine des émotions. En effet, de manière plutôt consensuelle, les émotions positives sont associées à un mouvement vers le haut tandis que les émotions négatives sont associées à un mouvement vers le bas. Seno, Kawabe, Ito et Sunaga (2013) ont étudié l'effet de lavection sur la valence émotionnelle par le biais d'une tâche de rappel en mémoire autobiographique. Les participants doivent se remémorer un événement, à partir d'un mot clef, face à un environnement visuel générant une sensation de mouvement vers le haut ou vers le bas. Les résultats indiquent que le sens de lavection module la valence des événements rappelés dans le sens des hypothèses des auteurs (attention, ce n'est pas une modulation de la valence perçue d'un même événement, mais une sélection d'événements de nature émotionnelle congruente avec l'illusion de mouvement). En séparant l'échantillon en deux groupes de participants en fonction de leur sensibilité à lavection (i.e., ceux qui ont rapporté unevection versus ceux qui ne rapportent aucune illusion de mouvement), les auteurs démontrent que lavection est probablement le facteur à l'origine de l'effet et non pas la seule présence d'un mouvement dans le champ visuel. Les auteurs proposent que lavection soit à l'origine d'une modification de l'humeur et que cette humeur modulée par lavection sélectionne des événements passés congruents avec l'humeur ressentie. Lavection a très peu été étudiée en association avec des tâches de mémoire épisodique. Dans cette dernière expérience par exemple, la tâche de rappel n'est qu'un moyen d'avoir accès au produit de l'amorçage émotionnel engendré par lavection.

D) Quel(s) lien(s) entre vection et cognition ? L'hypothèse d'un partage de processus et non de ressources attentionnelles ou d'informations sensorielles

L'hypothèse explorée dans les expériences suivantes propose qu'un partage de processus, et non un partage d'informations sensorielles ou un effet d'amorçage, soit à l'origine de l'interférence entre vection et cognition. La vection en roulis et la remémoration épisodique mettraient toutes deux en jeu un processus d'orientation dans l'espace pour avoir lieu. Ainsi, la vection et la remémoration épisodique ne pourraient pas être réalisées/expérencées en même temps. Cependant cet effet ne serait pas dû à une charge cognitive dépassant les capacités de traitement de l'information par l'individu à un instant donné. En effet, une interaction est attendue entre le type de tâche de mémoire et l'environnement visuel. La situation de double tâche mémoire sémantique-vection ne devrait générer aucune interférence, ou une interférence moins importante que celle mesurée dans la situation de double tâche remémoration-vection. Cette interaction permet d'écarter l'hypothèse d'une simple charge attentionnelle ou cognitive.

Au regard des effets mis en évidence dans la littérature et des limites des précédents paradigmes expérimentaux, une des ambitions de ces expériences est de supprimer totalement le recours à la vision pour la présentation des stimuli de la tâche cognitive en proposant des tâches équivalentes mis à part la dimension épisodique. En effet, la position du regard peut avoir un effet sur la vection, tout comme l'attention portée au mouvement. Ainsi, une présentation auditive binaurale (i.e., sans indice d'orientation dans l'espace) des stimuli permet de s'assurer de l'optimisation des conditions visuelles de présentation de la vection tout au long de l'expérience. De plus, la littérature suggère que la seule présence d'une tâche cognitive peut modifier le report de la vection. Ainsi, nous comparerons les performances à deux tâches de mémoire (de difficulté équivalente) afin de dissocier l'effet de la double tâche de l'effet spécifique du partage de processus entre mémoire épisodique et vection. Enfin, pour évaluer l'effet de la vection, nous comparerons un environnement visuel générant une vection à un environnement visuel ne générant aucune illusion de mouvement de soi (i.e., soit statique soit avec un mouvement angulaire non uniforme). Grâce à ces deux conditions nous pourrions évaluer la modulation des performances mnésiques dues à la vection (i.e., dégradation ou amélioration).

Dans une situation de vection, les performances en mémoire épisodique devraient diminuer par rapport à une situation sans vection, à cause du partage du processus d'orientation dans l'espace entre ces deux tâches. Cette situation de vection devrait moins impacter, voire

pas du tout, les performances à la tâche de mémoire sémantique. Une interaction est donc attendue avec une équivalence des performances entre la condition vection et sans vection pour la tâche sémantique, tandis que pour la tâche épisodique, la situation de vection devrait diminuer significativement les performances par rapport à la situation sans vection (Expérience 3). L'interférence pourrait être également mise à jour sur les indicateurs posturaux, avec une modification posturale spécifique à l'association de la vection avec une tâche de mémoire épisodique. De la même manière, il est possible de faire l'hypothèse que des paramètres posturaux pourraient être modifiés entre la condition de mouvement uniforme (induisant une vection et une modification de la verticale perçue) et de mouvement non uniforme (absence de vection et de modification de la direction gravitaire perçue) seulement lors de la réalisation de la tâche de mémoire épisodique et non pas pour la tâche de mémoire sémantique (Expérience 5). En résumé, l'intérêt se porte de nouveau sur un effet d'interaction pour démontrer une implication de l'orientation spatiale spécifique à une tâche de mémoire épisodique.

V- Expérience 3 : Vection en position assise pendant la réalisation de tâches mnésiques épisodique et sémantique

A) Méthode

1. Participants

Trente-cinq participants volontaires ont participé à cette expérience (24 femmes et 11 hommes ; \bar{m} âge = 20,03 ans ; ET = 2,11). Sept autres participants ont été exclus de l'analyse à cause de données incomplètes causées par un dysfonctionnement informatique. Tous les participants avaient une vision et une audition normale ou corrigée, ne rapportaient aucune pathologie vestibulaire et ne prenaient aucun médicament susceptible de modifier les fonctions cognitives. Cette expérience a été réalisée en accord avec la déclaration d'Helsinki de 1964 et approuvée par le comité d'éthique de l'université Grenoble Alpes (IRB00010290-2018-04-03-42). Le participant signait un formulaire de consentement éclairé, lui expliquant ses droits, au début de l'expérience et, à la fin de celle-ci, l'expérimentateur répondait à toutes ses questions pendant le débriefing. La participation à l'expérience était rémunérée 15 euros.

2. Matériel

Induction de la vection. Une demi-sphère, dont la partie concave était blanche et recouverte de points de différentes couleurs et tailles était positionnée face au participant. Un moteur relié à

la sphère générait un mouvement angulaire uniforme susceptible d'induire une vection (voir Figure 8A). Le participant positionnait son menton sur la mentonnière qui était réglée en hauteur de sorte que son regard tombe, sans mouvement de la tête, sur le point noir central. Le siège sur lequel était assis le participant était également réglable en hauteur. La sphère tournait à une vitesse de 45 degrés/secondes vers la droite grâce à un moteur fixé à l'arrière (voir Figure 8B). Cette sphère était contrôlée par un ordinateur qui permettait de lancer la rotation pour une durée prédéterminée mais également d'arrêter la rotation à tout moment si le participant évoquait une sensation d'inconfort liée à l'environnement visuel en mouvement. L'ordinateur permettait également de recueillir les périodes exactes pendant lesquelles le participant appuyait, avec sa main dominante, sur le bouton situé sur la manette de réponse pour indiquer une vection.

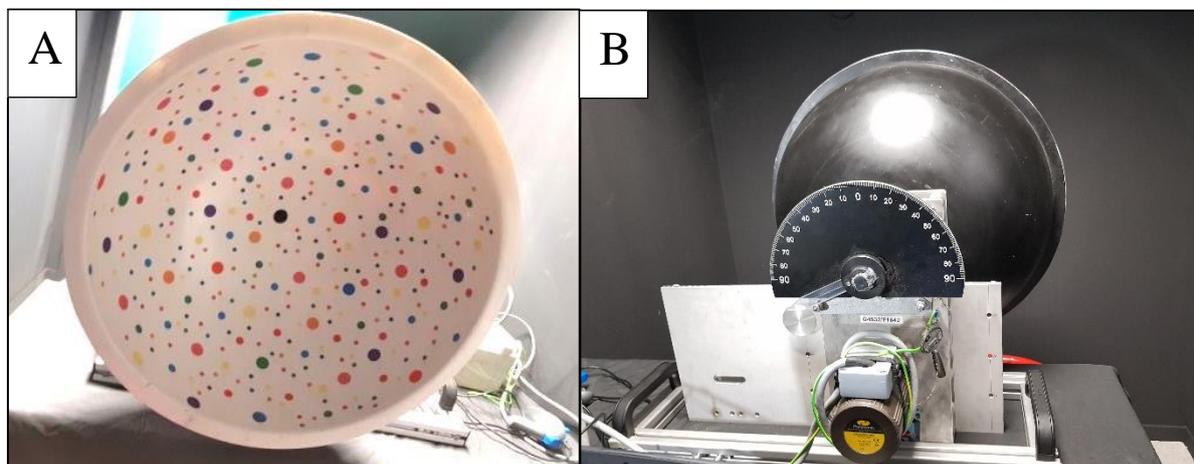


Figure 8: Illustration du dispositif utilisé pour générer une vection en roulis.

(A) Face du dispositif visible par les participants. Au centre le point noir servant de point de fixation. Une mentonnière était fixée sur le bord de la table afin que le participant repose son menton de sorte que la ligne de son regard soit face au point noir central. (B) Dos du dispositif, sa structure et le moteur permettant sa rotation vers la droite à une vitesse angulaire uniforme de 45 degrés par seconde.

Tâches mnésiques. La tâche de mémoire de source et la tâche de comparaison d'objets sont identiques à celles des expériences précédentes. Pour la tâche de mémoire épisodique, les participants apprenaient les trois listes de mots, selon des modes de présentation différents, et n'étaient pas avertis du véritable but de cet apprentissage, à savoir le rappel de source qui se déroulait 10 minutes après dans une autre salle. Pour la tâche de mémoire sémantique, les participants devaient comparer des paires d'objets et choisir sur quelle caractéristique ils sont le plus similaire (i.e., flexibilité, forme ou poids). La limite de trois secondes pour répondre à la tâche ajoutée lors de l'Expérience 2 a été maintenue.

Les stimuli étaient diffusés auditivement dans un casque grâce à E-prime 2.0 (Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA) contrôlé par un second ordinateur. Un microphone relié à E-Prime était utilisé pour enregistrer les réponses et mesurer le temps s'écoulant entre la fin de la présentation auditive du stimulus et le début de la réponse verbale du participant.

3. Procédure

L'expérience débutait dans un box expérimental dans lequel le participant apprenait les trois listes de mots. Cette première phase, qui durait approximativement 40 minutes, lui était présentée comme une tâche de mémoire à court terme et était identique à la phase d'apprentissage des deux expériences précédentes. Ensuite, le participant se rendait dans un autre box dans lequel se déroulait la seconde phase en double tâche qui durait environ 50 minutes.

Cette seconde phase débutait par une familiarisation de 30 secondes à la stimulation en mouvement. L'expérimentateur demandait au participant de fixer le point noir central tombant face à sa ligne de regard (grâce au réglage de la mentonnière), et de ne pas suivre les points des yeux pendant le mouvement. Il devait, grâce à un bouton réponse situé sur une manette qu'il tenait dans sa main dominante, indiquer s'il se sentait, ou non, en mouvement. Pendant toute la durée de la rotation de la demi-sphère, le participant avait pour consigne de maintenir l'appui tant qu'il se sentait en mouvement et de relâcher lorsque cette sensation disparaissait. Suite à cette familiarisation, le participant était soumis à 180 secondes de stimulation pendant lesquelles il devait de nouveau indiquer grâce à la manette s'il se sentait ou non en mouvement. Cette mesure nous permettait par la suite de vérifier la susceptibilité à la vection de chacun de nos participants pendant une durée équivalente à la stimulation en double tâche.

Les consignes des tâches mnésiques étaient ensuite expliquées au participant. Chacune des deux tâches (i.e., épisodique et sémantique) était réalisée face à la demi-sphère en mouvement et face à la demi-sphère immobile. Les consignes de fixation du point noir central avec le menton posé sur la mentonnière restaient les mêmes. Les essais étaient organisés en blocs qui débutaient toujours par 30 secondes sans tâche. Ce temps permettait, dans la condition de mouvement uniforme, de laisser la vection apparaître. Ensuite, le participant entendait le premier mot et avait trois secondes pour donner sa réponse à voix haute. Cinq secondes de pause étaient insérées entre deux essais. Dans chaque bloc le participant réalisait six essais de la tâche épisodique et 6 essais de la tâche sémantique. À la fin du bloc, le participant avait deux minutes de pause pour regarder au loin et se reposer. Avant le changement de tâche, la consigne de la

tâche à venir était rappelée au participant ainsi que les trois réponses possibles. L'ordre des tâches mnésiques était contrebalancé entre les blocs.

Comme dans l'Expérience 2, afin que le temps d'exposition à la stimulation visuelle en mouvement soit équivalent entre la tâche de mémoire épisodique et sémantique malgré une possible différence dans les temps de réponse, le temps de pause inter-essais était crédité du temps de réponse restant (i.e., $5000 \text{ ms} + (3000 \text{ ms} - \text{temps de réponse à l'essai}) = \text{temps de pause qui suit l'essai}$). Ainsi, que le participant réponde rapidement ou lentement aux six essais ne changeait pas la durée du bloc. Un bloc durait environ trois minutes. L'expérience contenait huit blocs, quatre en condition statique et quatre en condition mouvement angulaire uniforme. La condition de mouvement était alternée et l'ordre contrebalancé entre les participants.

Pour les tâches mnésiques, le temps de réponse à chaque essai ainsi que l'exactitude de la réponse étaient enregistrés. Pour la mesure auto-rapportée de la vection pendant les trois minutes de stimulation visuelle en simple tâche au début de la seconde phase de l'expérience, la latence de la vection (i.e., temps écoulé avant le premier appui), le nombre d'épisodes de vection (i.e., nombre d'appuis), la durée de la vection (i.e., temps passé en appui sur le bouton indiquant la perception d'un mouvement de soi), et le pourcentage de temps passé en vection (i.e., temps passé en vection rapporté au temps total de présentation de la stimulation) étaient mesurés. À noter que la vection n'était pas mesurée pendant la situation de double tâche pour éviter au participant d'avoir une troisième tâche à effectuer en parallèle de la tâche mnésique et du maintien de la position assise face à l'environnement en mouvement. De plus, cette tâche de cotation d'une sensation corporelle n'avait aucun équivalent dans la condition d'immobilité de la demi-sphère et aurait engendré une disparité dans les tâches cognitives à effectuer avec la condition mouvement uniforme.

B) Résultats

1. Auto-report de la vection en situation de simple tâche

L'auto-report de la vection en position assise au début de l'expérience indique que tous les participants ont ressenti au moins une fois une illusion de mouvement en trois minutes de stimulation, temps total d'un bloc en double tâche. Les différences interindividuelles sont cependant assez importantes (Tableau disponible à l'Annexe IV). La latence moyenne d'entrée en vection était de 15,74 secondes (ET = 22,88 secondes). Les 30 secondes de présentation du stimulus seul lors des blocs en double tâche suffisent donc pour générer une vection avant le

début des tâches cognitives. En moyenne les participants reportent 5,18 épisodes de vection (ET = 3,11) pendant les trois minutes de stimulation, avec en moyenne 51,90% du temps passé en vection (ET = 25,56).

2. Performances mnésiques

Pour l'analyse des performances mnésiques, les réponses données après les trois secondes du temps limite sont considérées comme fausses et sont exclues de l'analyse. La tâche épisodique ($\bar{m} = 73,45\%$; ET = 11,75 ; $t(1 ; 34) = 23,07$; $p < 0,05$) ainsi que la tâche sémantique ($\bar{m} = 68,45\%$; ET=12,36 ; $t(1 ; 34) = 19,48$; $p < 0,05$) étaient toutes deux réussies au-delà du hasard (i.e., 33% car trois réponses possibles dans chacune des tâches)

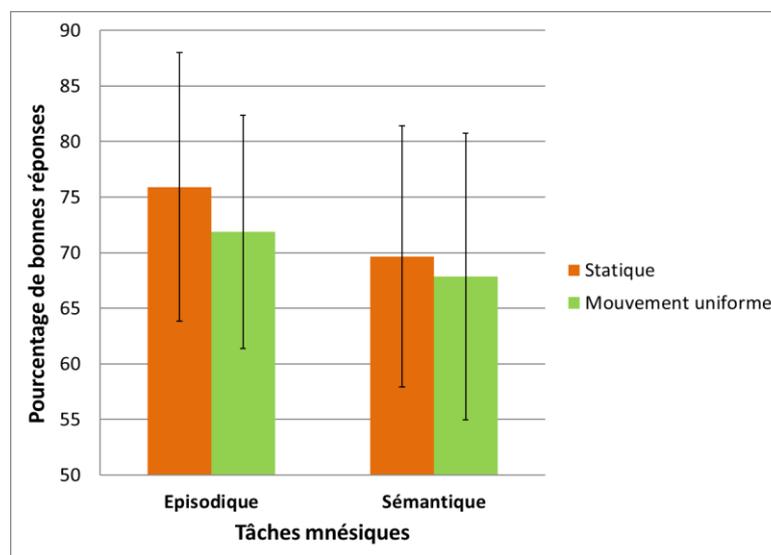


Figure 9: Pourcentage de bonnes réponses en fonction de la tâche mnésique (i.e., épisodique ou sémantique) et de l'environnement visuel (i.e., statique ou mouvement angulaire uniforme). Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

L'ANOVA réalisée sur le pourcentage de bonnes réponses (voir Figure 9) mettait en évidence un effet significatif de la condition de vision sur les performances ($F(1 ; 34) = 4,44$; $p < 0,05$). En condition de mouvement ($\bar{m} = 69,52\%$; ET = 12,36) les performances étaient en moyenne plus faibles qu'en condition immobile ($\bar{m} = 72,38\%$; ET = 12,73). Le type de tâche ne semblait cependant pas avoir d'effet significatif sur les performances ($F(1 ; 34) = 4,12$; $p = 0,0503$). Nous discuterons des implications de la considération de cet effet, notamment s'il est envisagé comme trop proche du seuil pour être ignoré. La tâche épisodique ($\bar{m} = 73,45\%$; ET = 11,75) est aussi bien réussie que la tâche sémantique ($\bar{m} = 68,45\%$; ET=12,36). Il n'y avait pas d'interaction entre la condition de vision et le type de tâche de mémoire ($F(1 ; 34) = 0,46$; $p = 0,50$). La vection n'a donc pas plus interféré avec la tâche de mémoire épisodique que la tâche

mémoire sémantique au niveau du taux de bonnes réponses. Il est intéressant de noter que lors de la vection, les performances mnésiques à chacune des deux tâches restaient supérieures au hasard ($t(1 ;34) = 22,18 ; p < 0,05$ pour la tâche épisodique et $t(1 ;34) = 15,93 ; p < 0,05$ pour la tâche sémantique).

La seconde ANOVA, réalisée sur les temps de réponse (voir Figure 10), mettait en évidence un effet de la condition visuelle sur le temps de réponse ($t(1 ;34) = -3,01 ; p < 0,05$). Lorsque la tâche était réalisée face à l'environnement visuel en mouvement ($\bar{m} = 1466,10$ ms ; ET = 317,44) les temps de réponse étaient plus longs qu'en condition immobile ($\bar{m} = 1389,08$ ms ; ET = 306,73). Un effet significatif de la tâche de mémoire a également été observé ($t(1 ;34) = -6,54 ; p < 0,05$). Les temps de réponse à la tâche sémantique ($\bar{m} = 1552,76$ ms ; ET = 253,62) étaient en moyenne plus longs que les temps de réponse à la tâche épisodique ($\bar{m} = 1302,42$ ms ; ET = 318,99). Il n'y avait pas d'interaction entre ces deux facteurs ($t(1 ;34) = 1,07 ; p = 0,29$). La vection n'a donc pas impacté différemment les temps de réponse en fonction de la nature de la tâche mnésique (épisodique ou sémantique).

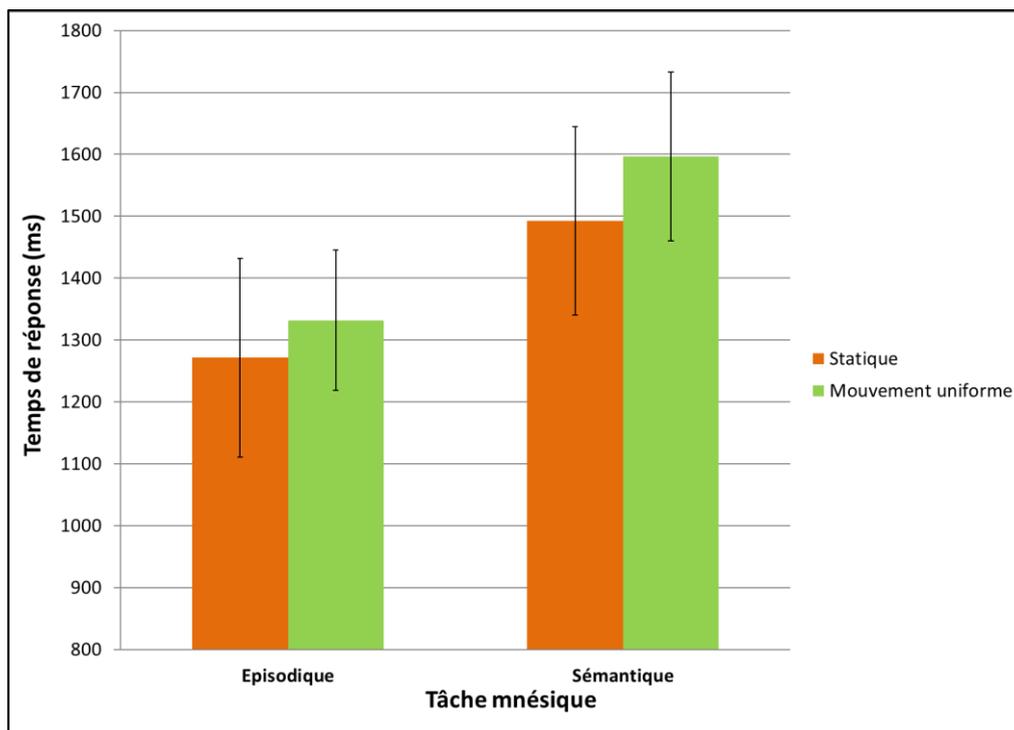


Figure 10 : Temps de réponse en millisecondes en fonction de la tâche mnésique (i.e., épisodique ou sémantique) et de l'environnement visuel (i.e., statique ou mouvement angulaire uniforme). Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

C) Discussion

Le but de cette expérience était de mettre en évidence un partage de processus entre la remémoration et la vection. L'hypothèse principale supposait une interaction entre le type de tâche mnésique (i.e., épisodique vs. sémantique) et l'environnement visuel (i.e., immobile vs. en mouvement angulaire uniforme). Autrement dit, il était attendu que la vection ait un effet uniquement sur la tâche de remémoration épisodique, dans le sens d'une dégradation des performances mnésiques. Cependant, les résultats ne mettent en évidence aucun effet d'interaction entre l'environnement visuel et la tâche mnésique, que ce soit au niveau des bonnes réponses ou des temps de réponse.

Le taux de bonnes réponses nous révèle une possible différence, bien qu'en dessous du seuil de significativité, en termes de difficulté entre la tâche épisodique et la tâche sémantique qui n'avait pas été mise en évidence dans l'Expérience 2 (i.e., une fois la limitation du temps de réponse mis en place). Comme développé à la suite de la première expérience, même si cette différence est jugée non négligeable, la tâche épisodique est à la fois la plus facile des deux et celle pour laquelle un effet d'interférence est attendu. Ainsi, cette combinaison ne favorise pas l'observation de l'effet d'interaction attendu. L'effet du type de tâche mnésique sur le temps de réponse, mis en évidence dans l'Expérience 2 est également présent, avec un temps de réponse en moyenne plus long pour la tâche sémantique. Comme discuté dans le Chapitre précédent, la nécessité de passer en revue chacune des trois caractéristiques pour décider du trait évoquant le plus de similarité pourrait être à l'origine de cet effet. Les consignes des tâches n'ont pas été modifiées car l'hypothèse d'équivalence des tâches en termes de difficulté, plus précisément de charge cognitive, est soutenue par l'équivalence du taux de bonne réponse mais également de l'entropie, extraite du signal postural dans l'Expérience 2, qui indique un même niveau d'attention. L'expérience suivante, couplant la vection debout et la réalisation d'une tâche mnésique, nous donnera l'opportunité de répliquer ce résultat.

Indépendamment de la nature de la tâche mnésique, les performances globales diminuent lorsque le mouvement est présent par rapport à une situation où la demi-sphère est statique, avec une diminution du pourcentage de bonnes réponses et une augmentation du temps de réponse. Ce résultat est compatible avec ceux observés avec les matrices de Brooks. En effet, Ehrenfried et collaborateurs (2003) rapportent une diminution des performances à la tâche spatiale et verbale lors de la présentation de la stimulation visuelle en mouvement uniforme. Il faut cependant noter que le flux visuel n'était pas présenté lors du rappel des matrices, la vection avait lieu pendant l'encodage. Nos résultats suggèrent un effet général de détérioration des

performances mnésiques. Cependant, il est impossible de conclure avec certitude que cette baisse globale de performances est causée par la présence d'un mouvement dans le champ visuel ou par l'illusion de mouvement de soi (vection). Nous allons d'abord développer comment s'assurer que l'effet est bien dû à la nature du mouvement, puis nous développerons la question de la part jouée par la vection.

Tout d'abord, cette expérience ne permet pas de dissocier l'effet d'un simple mouvement dans le champ visuel de l'effet du mouvement angulaire uniforme susceptible d'induire une vection. Il faut néanmoins rappeler que l'effet d'interaction attendu ne nécessitait pas ce contrôle particulier. En effet, si la situation de mouvement uniforme avait engendré une dégradation des performances uniquement pour la tâche de mémoire épisodique, il n'aurait pas été possible de supposer un effet de « charge attentionnelle visuelle » sur la cognition. Seule l'hypothèse d'une interférence des processus spatiaux aurait pu expliquer ce pattern de résultats. Les tâches étant de difficulté équivalente, l'hypothèse d'un effet restreint à la tâche la plus difficile est également écartée. Par ailleurs, la condition de vection étant comparée à une situation statique, il est impossible, au vu de nos résultats, de conclure que ce sont les caractéristiques spécifiques du flux visuel qui altèrent les capacités mnésiques des participants. La dégradation des performances mnésiques aurait peut-être pu s'observer lors de n'importe quel mouvement visuel. Les caractéristiques du mouvement, telle que la vitesse constante et la cohérence du mouvement de tous les points, susceptibles d'engendrer une vection pourraient ne jouer aucun rôle dans la dégradation des performances. Dans le sens de cette hypothèse, Logie (1986) étudie l'effet de la présentation visuelle de matrices (i.e., neuf cases dont certaines sont colorées et d'autres laissées vides) plus ou moins complexes sur la performance à des tâches cognitives. La performance en rappel de mots diminue lorsque l'apprentissage s'est déroulé face à des stimulations visuelles changeantes. Dans leur paradigme, les changements perçus dans le champ visuel ne peuvent pas induire de vection. Il existerait donc un effet des informations visuelles, quelle que soit leur nature sur la performance à une tâche cognitive. Ainsi, afin de s'assurer que l'effet est induit par le mouvement angulaire uniforme (ainsi que par la vection qu'il est susceptible de générer), l'ajout d'une condition de mouvement visuel non uniforme et n'induisant pas de vection est indispensable.

Dans la littérature, très peu d'études à notre connaissance comparent les performances dans une condition pouvant générer une vection à une condition de mouvement visuel ne générant pas d'illusion de mouvement de soi. Cela peut s'expliquer par une différence dans les paradigmes expérimentaux habituels et celui proposé dans notre étude. En effet, la vection est généralement cotée par le participant en temps réel en parallèle de la tâche cognitive, alors que

les réponses à la tâche cognitive sont différées à la fin de la stimulation visuelle. Ensuite, une comparaison est effectuée entre les périodes de vection et de non vection, en prenant l'absence de vection reportée comme un simple mouvement dans le champ visuel. Cette méthodologie permet d'adresser l'hypothèse d'un effet de la vection en tant que telle sur diverses tâches et/ou mesures, tout en contrôlant pour la stimulation visuelle (qui est toujours un mouvement uniforme). Nous avons précédemment discuté de la perturbation posturale qui peut être observée même en l'absence de vection. Ainsi, la présence d'un mouvement uniforme (i.e., l'ensemble des éléments présents dans l'environnement visuel se déplace dans la même direction à vitesse constante) ne peut sans doute pas se substituer à une condition de mouvement partiel (i.e., seuls quelques objets bougent) ou non uniforme. Autrement dit, le mouvement visuel uniforme pourrait avoir un statut particulier, générer un traitement de l'orientation spatiale, qui pourrait avoir un effet sur les performances cognitives même lorsque sa présentation n'est pas accompagnée d'une sensation illusoire de mouvement de soi.

Dans cette expérience, il n'est pas possible de dissocier l'effet de la vection de l'effet de la simple présentation du mouvement visuel uniforme, car le report subjectif de la vection n'a pas été mesuré. Tout d'abord, il est difficile de demander aux participants de consciemment coter leurs sensations de mouvement (illusoires) en temps réel alors qu'ils réalisent simultanément une tâche de mémoire. Cette situation qui peut être considérée comme une triple tâche (i.e., maintenir et gérer son équilibre en position assise, effectuer une tâche de mémoire et évaluer ses sensations pour indiquer une vection en appuyant sur un bouton) devient extrêmement complexe et risquerait d'interférer avec les processus mesurés. Il est de plus possible que les participants alternent volontairement (ou non) entre l'attention portée sur la tâche et l'attention portée sur les sensations qui découlent de la présentation du stimulus en mouvement. De plus, le report subjectif de la vection pourrait être impacté par d'autres variables que le processus nécessaire à la réalisation de la tâche cognitive. Par exemple, une simple charge mentale pourrait détourner le participant de l'évaluation de ses sensations de mouvement afin de réussir la tâche, quelle qu'elle soit. Enfin, le codage subjectif nécessite également une attention portée à son corps, à sa position, à sa posture tout le long de l'expérience. Comme développé dans l'introduction du chapitre précédent, ce type de consignes peut influencer les stratégies de résolution de situations en double tâche.

L'absence d'une mesure de la vection en parallèle de la réalisation des tâches cognitives pourrait également expliquer que l'interférence n'ait pas pu être mise en évidence dans notre expérience. En effet, il est possible que l'interférence entre mémoire et vection existe et qu'elle

se manifeste sur l'intensité ou la durée de la vection plutôt que sur la performance mnésique. Si la mémoire épisodique implique un processus d'orientation pour reconstruire l'événement passé, il est à la fois possible que la vection rende la construction de cette scène difficile mais également que la remémoration épisodique empêche la vection d'avoir lieu ou l'affaiblit. Autrement dit, l'interférence entre deux tâches peut se mesurer sur les performances de l'une et/ou de l'autre. Il est donc nécessaire de modifier ce paradigme expérimental afin d'avoir accès à la fois aux performances mnésiques et à un indicateur du traitement spatial de l'orientation mais avec une mesure qui ne nécessite pas un auto-report de l'illusion.

Notre choix s'est porté sur la posture comme indicateur de la présence d'un effet de la vection (Palmisano et collaborateurs, 2015). Les expériences suivantes seront donc réalisées debout sur une plateforme de force face à différentes stimulations visuelles. L'expérience 4 aura pour but de répliquer les résultats de la littérature qui mettent en évidence une spécificité de la stimulation visuelle uniforme sur le contrôle postural notamment en termes de déviation des ajustements par rapport à un environnement visuel statique ou en mouvement non uniforme. Cette déviation comme nous l'avons vu plus haut serait liée à une modification de la verticale perçue. Dans l'expérience 5, les tâches mnésiques épisodique et sémantique seront effectuées debout sur cette plateforme de force face à une stimulation visuelle en mouvement uniforme ou non uniforme (situation de double tâche). En l'absence de report de la vection par le participant, l'hypothèse porte sur l'interférence entre le traitement d'un mouvement visuelle uniforme engendrant une désorientation spatiale et la remémoration épisodique. Il est en effet suggéré que le maintien de la posture face à un environnement visuel en mouvement uniforme et la mémoire épisodique partagent un processus de traitement de l'orientation dans l'espace. Les Expériences 4 et 5 ont fait l'objet d'un article accepté dans Plos One, (voir Annexe V) :

Tixier M, Rousset S, Barraud P-A, Cian C (2021) Postural responses to specific types of long-term memory during visually induced roll self-motion. *PLoS ONE*. 16(12): e0261266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261266>.

VI- Expérience 4 : Effet d'une stimulation visuelle en mouvement sur la posture

A) Hypothèses

Nous avons modifié le paradigme expérimental de telle sorte que (1) l'effet de l'environnement visuel soit mesurable grâce à des paramètres posturaux et que (2) les

stimulations visuelles en mouvement permettent de séparer l'effet d'un mouvement visuel susceptible d'engendrer une vection de l'effet d'un simple mouvement. Cette expérience s'effectue donc debout et vise à répliquer les effets du mouvement visuel uniforme enroulis sur les indicateurs de la posture mis en évidence dans la littérature. L'effet d'un mouvement uniforme sur la posture a été comparé à l'effet d'un environnement visuel statique mais également à celui d'un mouvement visuel ne générant pas de vection (i.e., mouvement non uniforme) afin de mettre à jour, si possible, des indicateurs spécifiques au mouvement visuel uniforme. Cette seconde opposition n'a jamais été adressée à notre connaissance dans la littérature. En effet, les paradigmes impliquant la vection sont très souvent sous-tendus par une question de recherche appliquée. Leur but est d'améliorer la réalité virtuelle grâce à une meilleure compréhension des effets qu'elle engendre. Le ressenti de l'utilisateur est donc central dans l'évaluation de la réalité virtuelle, que ce soit le ressenti d'une illusion de mouvement de soi ou de symptômes désagréables liés à la présentation d'un mouvement visuel uniforme (i.e., visually induced motion sickness, par exemple maux de tête, fatigue...). Ces questions de recherche peuvent expliquer également le fort attrait pour les échelles de cotation subjective de la vection (Murata, 2009 ; Stanney, Kingdon, Graber et Kennedy, 2009 ; Risi et Palmisano, 2019). Comme dans l'expérience de Tanahashi et collaborateurs (2007), la condition de vection devrait dévier le centre de pression sous les pieds dans le sens du mouvement sur l'axe parallèle au plan de présentation de la stimulation (i.e., médio-latéral). Cette déviation caractéristique ne devrait se retrouver ni dans la condition d'environnement visuel statique ni dans la condition de mouvement non uniforme. La variance des oscillations posturales devrait également varier en fonction de l'environnement visuel. Si le mouvement visuel quel qu'il soit engendre une augmentation de la variance, cette augmentation devrait être accrue dans la situation de vection (Tanahashi et collaborateurs, 2007).

L'ajout d'une tâche de répétition de mots permettra d'évaluer l'impact de l'articulation dans ces conditions expérimentales, ce qui à notre connaissance n'a jamais été testé dans la littérature. Le but est de mettre en évidence que l'effet de l'environnement visuel est observable en présence d'une verbalisation des réponses, qui engendre elle-même des modifications posturales. Comme les tâches mnésiques nécessitent une réponse verbale, un contrôle de leur effet sur la mesure posturale est nécessaire. Comme développé dans le Chapitre 3, l'articulation peut avoir un effet sur les indicateurs posturaux, et il est essentiel ici de pouvoir distinguer son rôle de celui de l'environnement visuel en mouvement. Par exemple, l'effet de la stimulation visuelle en mouvement uniforme pourrait être présent lors de l'écoute passive de mot mais

disparaître lors d'une simple répétition des mots entendus. La modalité verbale des réponses ne serait dans ce cas plus du tout adaptée dans ce paradigme.

B) Méthode

1. Participants

Vingt-quatre volontaires ont participé à cette expérience, onze femmes et treize hommes avec un âge moyen de 25,5 ans (écart-type = 4,9 ans). Cette étude a été réalisée en accord avec la déclaration d'Helsinki de 1964 et approuvée par le comité d'éthique de l'université Grenoble Alpes (IRB00010290-2018-04-03-42). Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée, n'ont reporté aucun antécédent de trouble de l'équilibre ou neuromusculaire et ont déclaré ne prendre aucun médicament susceptible de modifier les fonctions cognitives. Les participants donnaient leur consentement libre et éclairé par écrit avant de commencer l'expérience, et recevaient à la fin de celle-ci une compensation financière après l'explication du but et des hypothèses.

2. Matériel

Stimulations visuelles. Les participants étaient exposés à des stimuli visuels présentés sur un écran de télévision (Samsung 4K UHD, 3840 x 2160 pixels), relié à un ordinateur, avec une fréquence de rafraîchissement de 60 Hertz. Pour limiter les indices de verticalité ou d'horizontalité, l'expérience se déroulait dans le noir et l'écran était recouvert d'un carton plume noir dans lequel était découpé une zone circulaire centrale de 72 centimètres de diamètre. Seules les informations visuelles présentées dans cette zone étaient donc visibles par le participant. Les stimuli présentés étaient tous composés d'un fond gris foncé et de points de différentes tailles et de différentes couleurs, qui recouvraient environ 40 pour cent de l'aire du cercle visible. Au centre du cercle, une croix blanche servait de point de fixation pendant toute la durée de l'essai (voir Figure 11). L'écran était ajustable en hauteur pour aligner la croix de fixation avec la ligne du regard du participant, de sorte qu'il ne soit pas nécessaire ni de lever ni de baisser la tête pour fixer la croix. Le participant était positionné à environ 45 centimètres de l'écran, la stimulation visuelle recouvrait donc environ 77 degrés d'angle du champ visuel du participant.

Trois vidéos de ces points ont été construites. Dans la première, le pattern de points restait statique, dans la deuxième les points se déplaçaient selon un mouvement angulairement uniforme et dans la dernière, les points se déplaçaient de manière non uniforme. Dans la

condition de mouvement uniforme, les points tournaient tous dans le sens des aiguilles d'une montre à une vitesse angulaire de 30 degrés par seconde. Les points ne bougeaient pas les uns par rapport aux autres, le mouvement impliquait donc le pattern entier. Ainsi, dans cette condition, unevection en roulis pouvait être générée. Dans la condition de mouvement non uniforme, la moitié des points tournaient dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que l'autre moitié se déplaçait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Afin d'éviter la perception d'un stimulus bistable, c'est-à-dire une perception devection vers la droite puis vers la gauche en fonction du sens du mouvement prenant le dessus dans la perception, la vitesse linéaire de chaque point de la condition uniforme a été réattribuée aléatoirement aux points de la condition non uniforme. En effet, tous les points dans la condition uniforme ont une vitesse angulaire de 30 degrés par seconde. Cependant, les points au centre ont moins de distance à parcourir que les points à l'extérieur du cercle pour couvrir les 30 degrés. Ainsi, les points du centre ont une vitesse linéaire plus faible que les points à l'extérieur. En condition non uniforme, la vitesse linéaire de chaque point est indépendante de sa position dans le rayon du cercle. Ainsi, les points se déplaçaient les uns par rapport aux autres, aucun pattern ne se détachait de la stimulation pour suggérer un mouvement cohérent. Lorsque les points se croisaient, leur trajectoire n'était pas déviée mais un point passait devant l'autre. Cependant, aucun point n'était toujours au premier ou au second plan pour ne générer aucune impression de profondeur. Autrement dit, un point pouvait passer par-dessus certains et par-dessous d'autres. Les caractéristiques physiques des deux stimulations en mouvement (i.e., nombre de points, vitesse, couleurs) sont donc les mêmes mais la condition non uniforme ne devrait générer aucunevection.

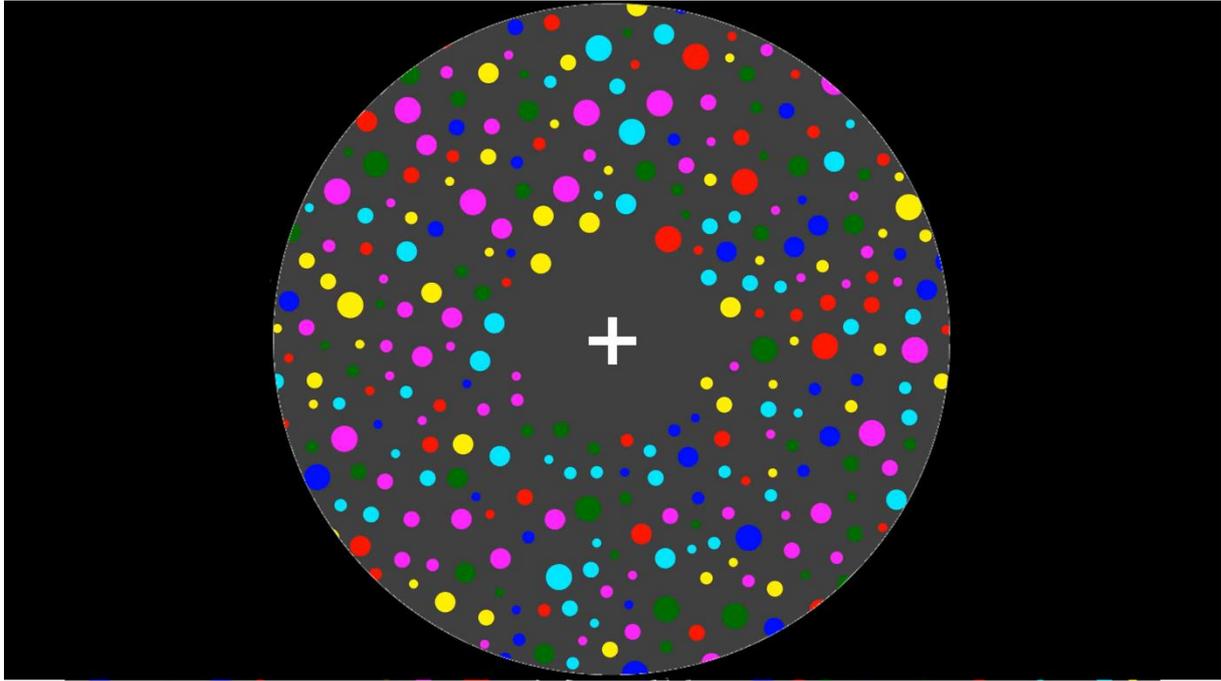


Figure 11 : Image du pattern de points utilisé pour générer les vidéos de mouvement uniforme et non uniforme.

C'était également l'image fixe face à laquelle l'enregistrement de la posture de référence était effectué pendant 10 secondes au début de chaque bloc (voir procédure). Les points se mettaient ensuite à tourner vers la droite de manière coordonnée à une vitesse angulaire de 30 degrés par seconde (condition de mouvement uniforme), soit se mettaient à tourner vers la droite et vers la gauche à des vitesses différentes (condition de mouvement non uniforme).

Tâches additionnelles. Deux tâches ont été construites pour contrôler l'effet de la simple articulation de mots sur la posture maintenue face à un environnement visuel statique ou en mouvement (i.e., uniforme ou non uniforme). Une tâche de répétition à voix haute de mots présentés auditivement a été comparée à une tâche d'écoute passive de mots sans répétition. Trente-six noms communs ont été enregistrés en français et ont été utilisés comme stimuli auditifs dans les tâches de répétition et de non-répétition. Dans la tâche de répétition, les participants entendaient un mot et avaient au maximum trois secondes pour le répéter à voix haute après la fin de la stimulation auditive. Dans la tâche de non-répétition, les participants entendaient également un mot enregistré mais avaient pour consignes d'écouter passivement. Les participants portaient un casque dans lequel étaient diffusées les stimulations auditives binaurales et un microphone enregistrait les réponses verbales. Ce matériel était contrôlé grâce à E-prime 3.0 professionnel (Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA).

Plateforme et tâche posturales. La posture a été mesurée avec la même plateforme de force que celle utilisée dans les Expériences 1 et 2 (Chapitre 3). Les participants étaient pieds nus sur la plateforme, les talons écartés de deux centimètres et les pieds ouverts avec un angle de 30

degrés. Le participant avait pour consignes de tenir debout, les bras le long du corps, en évitant tous types de mouvements volontaires (e.g., se gratter le nez, s'étirer...). Il devait regarder droit devant lui une croix de fixation au centre de l'écran de télévision pendant toute la durée de la mesure. Des lignes, tracées sur une feuille fixée au milieu de la plateforme, permettaient d'indiquer l'angle d'ouverture des pieds et le positionnement des talons sur la plateforme, afin que la position du participant soit la plus proche possible entre les mesures même s'il descendait de la plateforme.

3. Procédure

Avant le début de l'expérience, les trois vidéos (i.e., points statiques, en mouvement uniforme et en mouvement non uniforme) étaient présentées aux participants pendant 30 secondes afin qu'ils se familiarisent avec les stimulations visuelles. L'expérience, qui durait au total une demi-heure environ, était divisée en six blocs, soit deux pour chaque environnement visuel (i.e., statique, uniforme, non-uniforme). Chaque bloc correspondait à six essais à la tâche de répétition et six essais à la tâche de non-répétition. L'ordre des tâches a été contrebalancé entre les blocs.

Au début de chaque bloc, les participants voyaient une image des points pendant 10 secondes. La position moyenne des oscillations mesurée pendant cette période a été utilisée comme référence pour le calcul de la déviation posturale induite par les différents mouvements visuels pendant les tâches additionnelles (voir Figure 12). Il est intéressant de noter que si dans l'expérience précédente une latence de 30 secondes au début du bloc était respectée pour laisser à la sensation de mouvement de soi le temps d'apparaître, cette latence a été réduite à 10 secondes dans cette expérience. En effet, l'hypothèse ne porte plus sur lavection mais sur l'exposition à un flux visuel uniforme engendrant un traitement de l'orientation spatiale. La vidéo était ensuite projetée durant 128 secondes. La consigne de la première tâche était présentée auditivement lors de la première seconde. Le participant entendait alors le premier mot, avait trois secondes pour le répéter ou non, suivi de cinq secondes de repos avant la présentation du deuxième mot et ainsi de suite pour six essais consécutifs (pour une durée de 54 secondes). En fonction de la première tâche demandée au participant, les consignes de l'autre tâche étaient ensuite présentées. Les six essais de la seconde tâche étaient effectués pendant une autre période de 54 secondes pendant laquelle la posture était mesurée. Le participant avait pour consignes de fixer la croix blanche devant lui pendant toute la durée du bloc, quel que soit l'environnement visuel présenté.

Les blocs étaient séparés d'une période de repos de deux minutes pendant laquelle le participant descendait de la plateforme. L'ordre des conditions visuelles était contrebalancé entre les participants. Les stimuli étaient entendus soit dans la tâche de répétition soit dans la tâche de non-répétition, l'attribution à la condition était contrebalancée entre les participants.

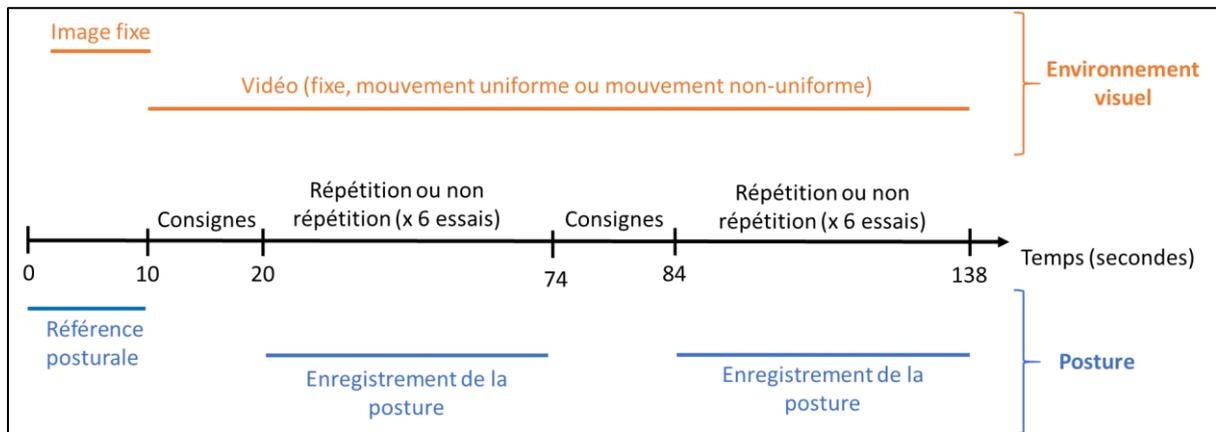


Figure 12 : Déroulement d'un bloc de l'expérience préliminaire avec les informations présentées visuellement (en orange), les tâches du participant (en noir) et les périodes d'enregistrement posturales utilisées pour le calcul des indices posturaux (en bleu).

C) Indicateurs posturaux

Pour l'évaluation de la posture, nous avons utilisé les séries temporelles du CoP collectées pendant la période stationnaire initiale (ligne de base, 0-10s) de chaque bloc pour définir la position initiale du participant. Les indicateurs posturaux des enregistrements de 54 secondes réalisés pendant la tâche additionnelle (phase de répétition et de non-répétition) lors de chaque condition visuelle (mouvement uniforme et non uniforme) de 54 secondes. Les séries temporelles du CoP ont d'abord été filtrées à l'aide d'un filtre Butterworth passe-bas de deuxième ordre avec une fréquence de coupure de 5 Hz. Trois paramètres ont été choisis : la déviation du CoP a été utilisée comme indicateur de l'orientation posturale, la variance a été choisie comme mesure de la stabilité posturale et la régularité des oscillations a été estimée par l'entropie afin d'apprécier la quantité d'attention investie dans le contrôle postural. Les modifications du signal postural sont attendues sur l'axe médio-latéral car il est parallèle au mouvement présenté (i.e., en roulis de gauche à droite). Les trois indicateurs présentés sont également calculés sur l'axe antéro-postérieur mais aucun effet de l'environnement visuel n'est attendu. Pour chaque participant, chaque tâche additionnelle et chaque condition visuelle, la déviation dans les directions médio-latérale et antéro-postérieure a été évaluée comme le déplacement du CoP pendant la phase de double tâche par rapport à la position de référence

(dix premières secondes en présence d'un champ visuel statique au début de chaque bloc). Les valeurs positives dénotent une déviation posturale vers la droite sur l'axe médio-latéral et vers l'avant pour l'axe antéro-postérieur. La variabilité des trajectoires sur les deux axes a été évaluée pour quantifier l'importance du balancement postural (Pietro et collaborateurs, 1996). Plus la variance est grande, plus les points sont éloignés de la position moyenne, c'est-à-dire plus les oscillations sont amples sur l'axe considéré, ce qui peut être interprété comme une diminution de la stabilité. Enfin, nous avons utilisé l'entropie du signal postural pour estimer la régularité du stabilokinésigramme sur les deux axes. Ces variables ont été calculées comme dans l'Expérience 2. Des valeurs d'entropie faible impliquent des séries temporelles du CoP plus régulières et moins complexes. Inversement, des valeurs d'entropie plus élevées impliquent des séries temporelles plus complexes et aléatoires. Tous les calculs ont été effectués avec le logiciel Matlab (R2019b, mise à jour 6).

D) Résultats

Déviaton moyenne du centre de pression sous les pieds (Voir Figure 13)

- Sur l'axe médio-latéral, un effet principal de la stimulation visuelle est mis en évidence ($F(2, 46) = 28,24 ; p < 0,05$). Une déviation de la posture dans le sens du mouvement (i.e., vers la droite) pendant la situation de mouvement uniforme ($\bar{m} = 6,32$ mm ; SE = 1,00) est observée, tandis que pour les conditions de mouvement non uniforme et l'absence de mouvement, le CoP moyen ne différait pas de la référence posturale enregistrée durant les dix secondes précédant le début du mouvement ($ps > 0,05$; \bar{m} non uniforme = -0,50 mm et SE = 0,50 ; \bar{m} statique = 0,32 mm et SE = 0,64). Il n'y avait pas d'effet significatif de la présence de la tâche additionnelle ($p = 0,098$) sur la déviation moyenne du CoP, ni d'interaction entre la présence de la tâche additionnelle et la stimulation visuelle ($p = 0,68$).

- Sur l'axe antéro-postérieur, un effet principal de la stimulation visuelle a également été mis en évidence ($F(2 ; 46) = 9,76 ; p < 0,05$). Dans la situation de présentation du mouvement uniforme, le CoP avait tendance à se déplacer vers l'avant, résultat d'une inclination du corps du participant vers l'avant ($\bar{m} = 4,90$ mm ; SE = 1,55). Dans les conditions statique et de mouvement non uniforme, la moyenne du CoP ne diffère pas de la référence enregistrée au début bloc (\bar{m} non uniforme = 0,67 mm et SE = 1,02 ; $p = 0,51$; \bar{m} statique = -1,92 mm et SE = 1,10 ; $p = 0,08$). Il n'y avait pas d'effet significatif de la présence de la tâche additionnelle sur la déviation moyenne du CoP ($p = 0,46$), ni d'interaction entre la présence de la tâche additionnelle et la stimulation visuelle ($p = 0,07$).

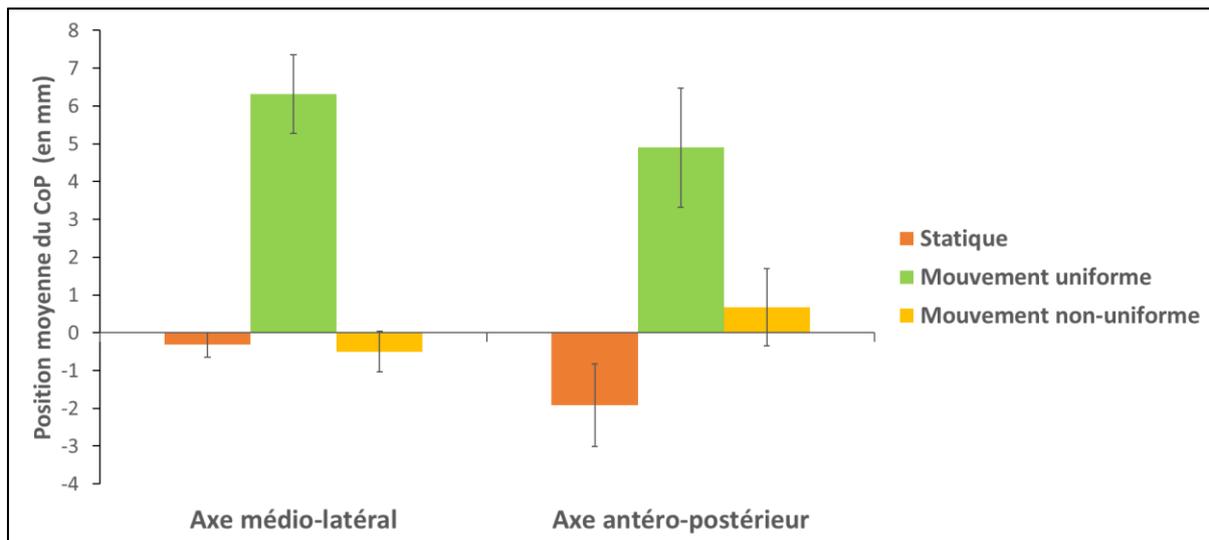


Figure 13 : Déviation moyenne du centre de pression sous les pieds en fonction de l'environnement visuel présenté (i.e., statique, mouvement uniforme, mouvement non uniforme) pour l'axe médio-latéral et antéro-postérieur.

Sur ce graphique, la déviation du CoP a été moyennée pour les deux tâches additionnelles (i.e., répétition et non-répétition) car aucun effet significatif de l'ajout de la tâche sur la déviation moyenne du CoP n'a été mis en évidence que ce soit sur l'axe médio-latéral ou antéro-postérieur. Une valeur positive correspond à un décalage vers la droite sur l'axe médio-latéral et vers l'avant sur l'axe antéro-postérieur et une valeur négative à un décalage vers la gauche sur l'axe médio-latéral et vers l'arrière sur l'axe antéro-postérieur. Les barres verticales représentent l'erreur standard autour de la moyenne.

Variance autour de la position moyenne du centre de pression sous les pieds

- Sur l'axe médio-latéral, un effet principal de la stimulation visuelle a été observé ($F(2 ; 46) = 22,08 ; p < 0,05 ; \bar{m}$ uniforme = 25,74 mm et SE = 2,1 ; \bar{m} non uniforme = 13,2 mm et SE = 1,87 ; \bar{m} statique = 7,68 mm et SE = 1,09). La condition de vection générerait plus de variance que la condition non uniforme qui elle-même générerait plus de variance que la condition statique ($ps < 0,05$). Il n'y avait ni d'effet de l'ajout de la tâche de répétition ($p = 0,24$) ni d'interaction entre ces deux facteurs ($p = 0,15$).

- Sur l'axe antéro-postérieur, il n'y avait pas d'effet de la stimulation visuelle ($p = 0,13$). Un effet de l'ajout de la tâche de répétition est mis en évidence ($F(1 ; 46) = 7,76 ; p < 0,05$). La variance était plus faible pendant la tâche de répétition que de non-répétition (\bar{m} répétition = 16,84 mm et SE = 1,91 ; \bar{m} non-répétition = 20,08 mm et SE = 3,07). L'interaction entre la présence d'une tâche cognitive et la stimulation visuelle n'était pas significative ($p = 0,50$).

Entropie du signal postural

- Sur l'axe médio-latéral, un effet principal de la stimulation visuelle ($F(2 ; 46) = 3,95 ; p < 0,05$) résultait en une plus grande entropie pour les conditions de mouvement (i.e., uniforme et non uniforme) que pour la condition statique (\bar{m} uniforme = 0,055 et SE = 0,005 ; \bar{m} non uniforme = 0,054 et SE = 0,005 ; \bar{m} statique = 0,046 et SE = 0,004 ; $ps < 0,05$). L'entropie dans les deux conditions de mouvement n'était pas significativement différente ($p = 0,68$). De plus, l'ajout d'une tâche cognitive générait également une différence d'entropie significative ($F(2 ; 46) = 21,12 ; p < 0,01$). Lors de la condition de non-répétition, l'analyse du stabilogramme indiquait une plus grande régularité dans le maintien postural que dans la condition de répétition, comme le démontre cette diminution de l'entropie (\bar{m} non-répétition = 0,048 et SE = 0,004 ; \bar{m} répétition = 0,055 et SE = 0,005). L'interaction entre ces deux facteurs n'était pas significative ($p = 0,32$).

- Sur l'axe antéro-postérieur, il y a également un effet de la stimulation visuelle ($F(2 ; 46) = 12,77 ; p < 0,01$), cependant sur cet axe, toutes les conditions étaient significativement différentes des deux autres (\bar{m} uniforme = 0,061 mm et SE = 0,004 ; \bar{m} non uniforme = 0,053 mm et SE = 0,004 ; \bar{m} statique = 0,046 mm et SE = 0,003 ; $ps < 0,05$). Un effet principal de l'ajout de la tâche cognitive a également été mis en évidence ($F(1 ; 46) = 12,43 ; p < 0,05$). De la même manière que sur l'axe médio-latéral, la condition sans tâche engendrait plus de régularité dans le maintien postural que la condition de répétition (\bar{m} non répétition = 0,050 et SE = 0,004 ; \bar{m} répétition = 0,056 et SE = 0,003). Aucune interaction entre ces deux facteurs n'a été mis en évidence ($p = 0,50$).

E) Analyses complémentaires

Les analyses présentées précédemment sont celles classiquement effectuées sur le signal postural recueilli lorsque le participant est face à une stimulation visuelle en mouvement uniforme. Pour pallier au non-respect de la condition de normalité de la variance (test de Shapiro-Wilk, $p < 0,05$), des tests non paramétriques ont été réalisés en complément. Des ANOVA de Friedman ont été conduites (seuil de significativité $p < 0,05$). Pour les comparaisons par paire, le test de Wilcoxon a été utilisé. Une correction de Bonferroni est appliquée lors des comparaisons post-hoc (seuil $p < 0,0055$).

- **Déviation moyenne du centre de pression sous les pieds** : Sur l'axe médio-latéral, l'effet de la condition visuel restait significatif ($\chi^2 (5) = 49,52 ; p < 0,000001$). Les

comparaisons post-hoc mettaient en évidence que le mouvement uniforme décalait bien le CoP dans le sens du mouvement par rapport aux deux autres conditions ($Z > 3,6$; $p < 0,0003$). La condition statique et non uniforme n'étaient pas significativement différentes l'une de l'autre ($Z = 0,14$, $p = 0,88$). L'effet de la tâche additionnelle restait non significatif (pour toutes les comparaisons, $Z < 1,23$; $p > 0,22$). Sur l'axe antéro-postérieur, le même pattern de résultats restait significatif pour la condition visuelle ($\chi^2(5) = 39,55$; $p < 0,000001$). Le mouvement uniforme induisait un déplacement vers l'avant en comparaison aux deux autres conditions (pour toutes les comparaisons $Z < 3,2$; $p < 0,0013$) qui ne différaient pas entre elles ($Z < 2,31$; $p > 0,02$). La présence d'une tâche additionnelle n'avait pas d'effet significatif ($Z < 2,14$; $p > 0,03$).

- **Variance** : Sur l'axe médio-latéral, l'effet de la condition de vision sur la variance restait significatif ($\chi^2(5) = 54,07$; $p < 0,000001$). La condition statique générait moins de variance que les conditions de mouvement (pour toutes les comparaisons, $Z > 3,28$; $p < 0,001$). Cependant, la différence de variance entre les conditions de mouvement ne dépassait pas le seuil de significativité ($Z < 1,88$; $p > 0,06$). Il n'y avait pas non plus d'effet de la tâche additionnelle (pour toutes les comparaisons par paire, $Z < 1,62$; $p > 0,10$). Sur l'axe antéro-postérieur, il n'y avait pas d'effet de la condition visuelle ($Z < 1,97$; $p > 0,05$) ni de la tâche additionnelle ($Z < 1,71$; $p > 0,08$).

- **Entropie** : Sur l'axe médio-latéral, l'entropie était équivalente quelle que soit la condition visuelle (pour toutes les comparaisons, $Z < 2,62$; $p > 0,008$) et aucun effet de la tâche additionnelle n'est mis en évidence (pour toutes les comparaisons, $Z < 2,60$; $p > 0,009$) malgré l'effet principal mis en évidence par l'ANOVA de Friedman ($\chi^2(5) = 25,02$; $p = 0,00014$). Sur l'axe antéro-postérieur, la même configuration est observée, avec un test global significatif ($\chi^2(5) = 28,52$; $p = 0,00003$) mais aucune différence entre les conditions, ni pour le facteur vision ($Z < 2,60$; $p > 0,009$) ni pour celui de la présence d'un tâche additionnelle (pour toutes les comparaisons, $Z < 2,65$; $p > 0,008$).

Les effets d'intérêt, à savoir la déviation du CoP dans le sens du mouvement, le mouvement visuel associé à une plus grande variance, et l'équivalence des conditions en termes d'attention, sont mis en évidence quel que soit le test statistique effectué. L'effet différenciateur de la variance entre le mouvement uniforme et le mouvement non uniforme est à interpréter avec précaution car il n'est plus mis en évidence lors des tests non paramétriques. Cependant, l'absence d'effet d'articulation pourtant répliqué à de nombreuses reprises dans la littérature pourrait conduire à penser que ces tests non paramétriques sont très conservateurs.

F) Discussion

Le but de cette expérience était de mettre en évidence des indicateurs posturaux pouvant marquer la spécificité de la présentation d'un mouvement visuel uniforme, comparativement à la présentation d'un mouvement non uniforme ou d'un environnement statique. L'axe médio-latéral était envisagé comme le plus pertinent au vu des résultats disponibles dans la littérature. En effet, l'illusion de pencher en roulis dans le sens opposé au mouvement donc vers la gauche, engendrerait une correction de la posture en se penchant réellement vers la droite, donc dans le sens du mouvement. Dans ce sens, la condition de mouvement uniforme engendre un décalage vers la droite de la position moyenne du sujet. Les conditions de mouvement non uniforme et statique n'engendrent aucune déviation (la position moyenne dans un bloc n'étant pas différente de la position de référence). Cette déviation mesurée sur l'axe parallèle à celui de la présentation d'un mouvement visuel uniforme réplique les données disponibles dans la littérature (Fushiki, Kobayashi, Asai et Watanabe, 2005 ; Tanahashi et collaborateurs, 2007 ; Thurrell et Bronstein, 2002).

La variance sur l'axe médio-latéral est modulée par la présence d'un mouvement dans le champ visuel. En effet, les conditions de mouvement uniforme et non uniforme engendrent une augmentation de la variance par rapport à la condition statique suggérant une perturbation du contrôle postural en présence d'un environnement visuel en mouvement. Bien que la variabilité ait augmenté pendant un mouvement uniforme par rapport à un mouvement non uniforme, cette différence n'est plus significative lors des tests non paramétriques. Nous ne pouvons cependant pas conclure que nos données s'opposent à celles observées par Tanahashi et collaborateurs (2007). En effet, les auteurs ont calculé une variance sur les périodes de vection et une autre pour les périodes sans vection grâce aux réponses subjectives des participants. Les résultats mettent en évidence que l'instabilité posturale augmentait pendant les périodes de vection par rapport aux périodes sans vection. Dans notre expérience, en plus de l'aspect conservateur du test statistique utilisé, la sensation illusoire de mouvement n'a pas été mesurée. La vection n'étant pas un phénomène stable dans le temps, les épisodes de vection et de non vection peuvent se succéder au cours de la stimulation visuelle en mouvement, leur nombre et leur durée variant d'un individu à un autre (comme nous l'avons mis en évidence dans l'Expérience 3). La variance a donc été calculée sur toute la période de la stimulation sans tenir compte de l'alternance des perceptions, ce qui pourrait rendre compte de la faible différence de variance entre les deux stimulations visuelles.

La comparaison d'une condition de mouvement non uniforme à une condition de mouvement uniforme n'a, à notre connaissance, pas été testée dans la littérature. L'importance de la vision dans le maintien de la posture permet de supposer que la présence de mouvement dans le champ visuel, qu'il engendre ou non unevection, pourrait perturber le maintien postural. Dans la littérature, l'effet de la vision sur le maintien postural est évalué grâce à la présentation d'un mouvement uniforme (Kuno et collaborateurs, 1999) ou grâce à l'asservissement visuel (l'environnement visuel est statique dans le référentiel observateur, les mouvements ne génèrent aucun flux visuel, Clark et Riley, 2007). Balestrucci, Daprati, Lacquaniti et Maffei (2017) utilisent des stimulations visuelles en mouvement linéaire non uniforme et mettent en évidence des modifications posturales qui suggèrent que les indices visuels en mouvement jouent un rôle dans le contrôle postural (qui disparaissent lors de la fixation d'un point central). Cependant, les points en mouvement n'occupent pas tout le champ visuel, contrairement aux situations engendrant lavection, ce qui limite la comparaison de leurs résultats avec une condition de mouvement uniforme. La condition de mouvement angulaire non uniforme proposée ici est donc une condition nouvelle qui informe sur l'effet de la présence de mouvement dans le champ visuel pendant lequel le participant ne doit pas suivre le mouvement des yeux (i.e., poursuite oculaire).

Aucune variation de la déviation ou de la variance n'a été mise en évidence en fonction de la présence de verbalisation. L'attention engagée dans la tâche de répétition ne semble pas moduler l'orientation spatiale. Dans la littérature, l'articulation impliquée lors de la réponse à une tâche cognitive est connue pour influencer le balancement postural. Lorsque les participants verbalisent leurs réponses pendant la mesure posturale, l'activité musculaire, et la respiration, associées à la vocalisation peuvent contribuer à des changements dans le contrôle postural (voir Chapitre 3). L'absence d'effet de la tâche verbale sur la variance observée ici va à l'encontre de la littérature. Il faut souligner que des tests non paramétriques ont été utilisés, et que la production de mots n'est pas continue. En effet, dans la littérature, la répétition d'une même syllabe pendant toute la durée de la mesure est une tâche privilégiée. Dans cette expérience, seulement six mots bisyllabiques sont prononcés en 56 secondes d'enregistrement postural. Cette différence méthodologique pourrait rendre compte de l'absence d'effet de la présence d'une répétition. Il est important de souligner l'absence d'interaction entre l'environnement visuel (i.e., statique ou en mouvement uniforme ou non uniforme) et la présence d'une tâche additionnelle, qui permet de supposer que la présence d'une réponse verbale ne change pas la relation existante entre le mouvement visuel et la réponse posturale. Autrement dit,

l'articulation pourrait avoir un impact sur la posture mais ne module ni la position moyenne ni la variance du signal postural générées par l'environnement visuel.

L'entropie mesurée pendant la réalisation de la tâche de répétition de mots est différente de l'entropie mesurée lors de l'écoute passive. Dans cette expérience, la tâche de répétition exigerait plus d'attention que la tâche de non-répétition (i.e., entropie plus élevée). Seno et collaborateurs (2011) ont montré que l'ajout d'une tâche cognitive pendant la stimulation visuelle diminue l'intensité de l'illusion de mouvement. Une relation directe entre la régularité du CoP et la quantité d'attention investie dans le contrôle postural est supposée (Roerdink, De Haart, Daffertshofer, Donker, Geurts et Beek, 2006). Une entropie plus élevée indiquerait que l'attention est dirigée vers la tâche et non plus vers la posture (Stins, Michielsen, Roerdink et Beek, 2009). Cependant, l'entropie différencie les tâches additionnelles sur l'axe antéro-postérieur et non médio-latéral, axe défini comme le plus pertinent par rapport aux stimulations visuelles choisies dans cette expérience.

En résumé, même en l'absence de distinction entre les périodes où l'illusion de mouvement de soi est présente et les périodes où il n'y a pas de vection, les mesures posturales permettent de distinguer les deux types de stimulation visuelle en mouvement. Ainsi, la présence de la sensation de mouvement ne semble pas être le seul générateur de la déviation posturale. C'est également ce que suggèrent les résultats de Tanahashi et collaborateurs (2007) qui mesurent une déviation de la posture dans le sens du mouvement même lorsque seules les périodes sans report de l'illusion sont analysées. Palmisano et collaborateurs (2015) discutent des limites du report subjectif de la vection, et notamment le fait qu'elle ne doit pas être confondue avec d'autres sensations corporelles comme les symptômes associés au mal des transports, ou à une sensation d'instabilité globale. La mesure posturale semble donc pertinente pour capturer les modifications de l'orientation spatiale en présence d'un mouvement uniforme, et ce même en présence d'une tâche additionnelle impliquant une articulation de mots isolés.

VII- Expérience 5 : Vection en position debout pendant la réalisation de tâches mnésiques épisodique et sémantique

A) Hypothèses

Dans cette expérience, nous remplaçons les tâches de répétition et d'écoute passive de l'Expérience 4 par les tâches mnésiques épisodique et sémantique. Nous émettons l'hypothèse que le maintien de la posture face à un environnement visuel en mouvement uniforme partage

un processus de traitement de l'orientation dans l'espace avec la remémoration épisodique. Afin de différencier l'impact d'un simple mouvement dans le champ visuel, d'un effet du traitement de son orientation spatiale, nous avons également utilisé un mouvement non uniforme ne générant aucune illusion de mouvement. Nous attendons donc une interaction entre la nature du mouvement et le type de tâche mnésique, dans le sens d'une dégradation des performances à la tâche épisodique lors de la présentation du mouvement visuel uniforme par rapport au mouvement non uniforme et/ou d'une modulation des indicateurs posturaux en condition de mouvement uniforme lors de la réalisation de la tâche épisodique par rapport au mouvement non uniforme. Cet effet de l'environnement visuel sur la posture et les performances cognitives ne devrait pas s'observer lors de la réalisation de la tâche de mémoire sémantique.

Dans cette expérience, nous n'avons pas conservé les trois conditions de mouvement visuel de l'expérience précédente (uniforme, non uniforme et statique) et ce pour deux raisons. Tout d'abord, une condition supplémentaire par rapport aux expériences précédentes en double tâche nécessiterait l'ajout d'essais à la fois pour la remémoration épisodique et pour le jugement de similarité afin que les performances mnésiques puissent être analysées (i.e., assez d'essais dans chaque condition expérimentale). Cette contrainte pourrait être problématique pour la tâche épisodique qui nécessite déjà l'apprentissage de 51 mots. Augmenter encore le nombre de mots de chaque liste engendrerait des performances d'apprentissage moins bonnes et donc un rappel moins performant, ce qui n'est peut-être pas souhaitable car la mesure posturale est effectuée pendant un bloc en entier (soit 6 ou 12 essais) pour lequel il n'est pas possible d'écarter les non-réponses ou les erreurs. Ainsi, diminuer les performances en rappel pourrait également diminuer la présence du processus d'intérêt durant la mesure posturale et donc diminuer la possibilité d'observer l'effet d'interaction que nous recherchons. De plus, la nécessité, vis-à-vis de la mesure posturale, d'effectuer les mesures en intra-sujet à cause des fortes variabilités inter-individuelles dans le maintien de l'équilibre, rendrait très longue la réalisation des deux tâches mnésiques dans les trois conditions. Les expériences précédentes durant déjà 90 minutes, il semble peu approprié d'ajouter encore quatre blocs expérimentaux pour tester les performances face à un environnement visuel statique. Les indicateurs posturaux ont tendance à évoluer avec la fatigue (Paillard, 2012), ce qui pourrait engendrer un fort effet d'ordre rendant le moyennage des blocs de début et de fin non pertinent. De plus, certaines études montrent une augmentation de la vection lors d'une exposition plus longue à la stimulation (Seno et collaborateurs, 2018) alors que d'autres observent une disparition des effets de la vection sur la posture au cours du temps (Schneider, Jahn, Dieterich, Brandt et

Strupp, 2008). Il est cependant nécessaire de souligner que les conditions expérimentales sont très différentes avec une position assise versus une tâche de marche et la présentation des stimulations visuelles s'effectue sur un écran ou grâce à un dispositif de réalité virtuelle positionné sur la tête du participant. Ainsi, une comparaison de la déviation posturale au début et à la fin de l'expérience semble nécessaire pour écarter l'hypothèse d'une diminution de la susceptibilité au mouvement angulaire uniforme, bien que Tanahashi et collaborateurs (2007) ne mettent en évidence aucun effet du temps d'exposition à la stimulation avec un paradigme expérimental en termes de type de stimulation, de temps d'exposition, de posture et de dispositif de présentation des stimuli visuels proche du notre.

B) Mesures

Au vu des résultats de l'expérience précédente, nous nous intéresserons donc principalement aux variations du centre de pression sous les pieds au niveau de l'axe médio-latéral. Les mêmes indicateurs posturaux que ceux choisis dans l'expérience précédente seront utilisés (i.e., déviation moyenne, variance et entropie du centre de pression sous les pieds mesurés sur l'axe médio-latéral). Conserver les mêmes indicateurs nous permettra également de répliquer les résultats de l'expérience précédente concernant l'effet des deux types de mouvement sur la posture.

C) Méthode

1. Participants

Vingt-quatre participants volontaires ont pris part à cette expérience, seize femmes et six hommes âgés en moyenne de 20,7 ans (ET = 1,03). Cette étude a été réalisée en accord avec la déclaration d'Helsinki de 1964 et approuvée par le comité d'éthique de l'université Grenoble Alpes (IRB00010290-2018-04-03-42). Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée, n'ont reporté aucun antécédent de troubles de l'équilibre ou neuromusculaire et ont déclaré ne prendre aucun médicament susceptible de modifier les fonctions cognitives. Les participants donnaient leur consentement libre et éclairé par écrit avant de commencer l'expérience et recevaient à la fin de celle-ci une compensation financière ainsi qu'une explication du but et des hypothèses.

2. Matériel

Stimulations visuelles. Les vidéos des patterns de points en mouvements uniforme et non uniforme sont reprises de l'expérience précédente.

Tâches mnésiques. Les tâches épisodique et sémantique sont les mêmes que dans les Expériences 2 et 3. La tâche épisodique consiste en un rappel de source incident qui nécessite d'attribuer un mot présenté auditivement à une des trois listes présentées à l'apprentissage. La tâche sémantique consiste en un jugement de similarité pour des paires de mots, le choix s'effectue parmi trois caractéristiques, la flexibilité, la forme ou le poids. Le temps de réponse est toujours limité à trois secondes.

Comme dans les expériences précédentes, les stimuli étaient présentés auditivement dans un casque et le logiciel E-prime 3.0 professionnel (Psychology Software Tools, Inc., Pittsburgh, PA) a été utilisé pour gérer la présentation des stimuli ainsi que la temporalité des blocs. Le microphone rattaché à E-prime mesurait le temps écoulé entre la fin de la présentation auditive du stimulus et le début de la réponse donnée à voix haute pour le participant.

Plateforme et tâche posturales. L'enregistrement des données et la tâche posturale sont identiques à l'expérience précédente. Le participant se tenait donc debout, les pieds écartés selon un angle de 30 degrés et les talons séparés par deux centimètres.

3. Procédure

Les participants complétaient d'abord la phase d'apprentissage pour la tâche épisodique, identiques à l'Expérience 3. Cette phase durait approximativement 40 minutes. La phase en double tâche, d'environ 50 minutes, qui venait ensuite était réalisée dans une autre pièce. Dans cette seconde phase, les participants devaient exécuter une tâche épisodique ou sémantique en face d'un environnement visuel présentant soit un mouvement angulaire uniforme (générant unevection) soit un mouvement non uniforme (ne créant pas d'illusion de mouvement).

Cette deuxième phase en double tâche était organisée en huit blocs d'environ 140 secondes chacun. Contrairement aux expériences précédentes, chaque bloc ne comprenait qu'une seule tâche. Quatre blocs s'effectuaient donc avec la tâche épisodique et les quatre autres avec la tâche sémantique. Chaque bloc était composé de 12 essais (soit le même nombre que dans les expériences précédentes mais sans changement de la nature de la tâche, voir Figure 14). Au début du bloc, une image des points était présentée pendant 10 secondes et la posture mesurée servait de référence de position au calcul ultérieur de la déviation posturale. La vidéo débutait ensuite et les participants entendaient le type de tâche qu'ils allaient devoir effectuer

(i.e., rappel ou jugement de similarité) ainsi que les trois réponses possibles. La vidéo seule était présentée pendant 10 secondes pour laisser le temps à la vection, le cas échéant, d'apparaître. Ils entendaient ensuite le premier stimulus et avaient trois secondes pour répondre, suivi d'une période de repos inter-essai de 2 secondes. Douze essais étaient complétés à la suite. Comme dans l'Expérience 2, afin que le temps d'exposition à la stimulation visuelle en mouvement soit équivalent entre la tâche de mémoire épisodique et sémantique malgré une possible différence dans les temps de réponse, le temps de pause inter-essais était crédité du temps de réponse restant (i.e., $2000 \text{ ms} + (3000 \text{ ms} - \text{temps de réponse à l'essai}) = \text{temps de pause qui suit l'essai}$). Ainsi, que le participant réponde rapidement ou lentement aux douze essais ne changeait pas la durée du bloc ni le temps de mesure posturale. Entre chaque bloc, le participant avait deux minutes pour s'éloigner de l'écran, ils avaient donc le temps de s'asseoir ou marcher avant de débiter le bloc suivant. Ces huit blocs en double tâche étaient précédés et suivis d'un bloc de six essais avec une tâche de répétition (voir l'Expérience 4) face au mouvement uniforme et un autre bloc de six essais avec cette tâche de répétition face au mouvement non uniforme. Ces mesures permettaient de répliquer les résultats de l'expérience précédente et de vérifier la présence de la déviation posturale même après une exposition prolongée au flux visuel (trois minutes par bloc, pour quatre blocs, soit 12 minutes d'exposition au mouvement uniforme). Le déroulement d'un bloc était le même, sauf pour le nombre d'essais qui était réduit de 12 à 6.

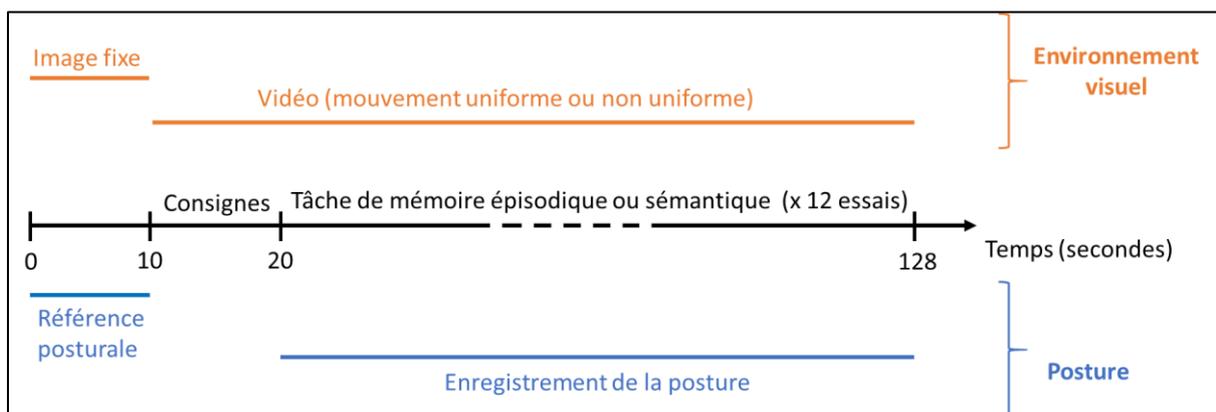


Figure 14 : Déroulement d'un bloc de l'expérience principale avec les informations présentées visuellement (en orange), les tâches du participant (en noir) et les périodes d'enregistrement posturales utilisées pour le calcul des indices posturaux (en bleu).

L'ordre des tâches mnésiques était contrebalancé entre les participants, la moitié des essais de chaque tâche mnésique étaient réalisés en condition de mouvement uniforme et l'autre moitié en condition de mouvement non uniforme. La condition associée à chaque stimulus était

contrebalancée entre les participants. La nature du mouvement s'alternait entre les blocs et l'ordre de présentation des deux types de mouvement était contrebalancé entre les participants.

D) Résultats

1. Effet du mouvement visuel sur les performances mnésiques

Nous avons mesuré le pourcentage de réponses correctes. Toutes les réponses dépassant les 3000 millisecondes ont été comptabilisées comme fausses. Les performances étaient significativement au-dessus du hasard (i.e., 33% car 3 réponses possibles) pour la tâche de mémoire épisodique ($t(1 ; 19) = 16,8 ; p < 0,05$) et de mémoire sémantique ($t(1 ; 19) = 16,04 ; p < 0,05$). Aucun effet significatif du type de tâche n'a été observé ($F(1 ; 19) = 0,03 ; p = 0,87$). La tâche épisodique engendrait donc la même proportion de bonnes réponses (\bar{m} épisodique = 73,75% ; ET = 11,98) que la tâche sémantique (\bar{m} sémantique = 73,27% ; ET = 13,10). La condition de stimulation visuelle n'a eu aucun effet significatif sur le pourcentage de bonnes réponses aux tâches de mémoire (\bar{m} uniforme = 73,75% et ET = 12,53 ; \bar{m} non uniforme = 74,69% et ET = 12,47 ; $F(1 ; 19) = 2,28 ; p = 0,15$). L'interaction entre le type de tâche mnésique et la condition de stimulation visuelle n'était pas significative ($F(1 ; 19) = 0,10 ; p = 0,75$).

Nous avons également mesuré le temps de réponse pour chaque essai. Toutes les réponses de plus de 3000 millisecondes ont été supprimées de l'analyse car elles dépassaient le temps limite de réponse et étaient donc considérées comme fausses. Un effet significatif du type de tâche est mis en évidence ($F(1 ; 19) = 12,58 ; p < 0,05$). Les temps de réponse à la tâche de mémoire épisodique (\bar{m} épisodique = 1491,90 ms ; ET = 265,69) sont en moyenne plus longs que les temps de réponse à la tâche sémantique (\bar{m} sémantique = 1303,64 ms ; ET = 271,72). Aucun effet significatif de la condition de vision n'a été mesurée ($F(1 ; 19) = 0,72 ; p = 0,41$). La condition de mouvement uniforme (\bar{m} uniforme = 1401,07 ms ; ET = 276,20) engendrait des temps de réponse sensiblement identiques à la condition de mouvement non uniforme (\bar{m} non uniforme = 1374,48 ms ; ET = 348,18). Aucune interaction entre les deux facteurs n'a été observée ($F(1 ; 19) = 0,54 ; p = 0,47$).

2. Effet du mouvement visuel et des tâches mnésiques sur les indicateurs posturaux

Déviation moyenne du centre de pression sous les pieds

- Sur l'axe médio-latéral, un effet principal de la condition de stimulation visuelle a été observé ($F(1 ; 19) = 30,58 ; p < 0,05$). Lors de la présentation du mouvement uniforme, la

position moyenne du sujet dévie vers la droite (i.e., dans le sens du mouvement visuel, \bar{m} mouvement uniforme = 5,54 mm ; SE = 1,72) alors que dans la condition de mouvement non uniforme la position moyenne pendant le mouvement ne diffère pas de la position de référence enregistrée face à un environnement fixe au début du bloc (\bar{m} mouvement non uniforme = -0,93mm ; SE = 0,63). Il n'y avait aucun effet principal de la tâche de mémoire ($p = 0,56$) ni d'interaction entre le facteur tâche mnésique et stimulation visuelle ($p = 0,61$).

Il n'y a aucun effet d'ordre ($p = 0,73$), lorsque nous avons comparé l'effet du mouvement uniforme sur la posture avant, pendant et après les blocs de double tâche, aucun effet significatif du moment de la mesure n'a été observé. Autrement dit, la déviation moyenne du centre de pression sous les pieds pendant la vection lors de la tâche de répétition au tout début de l'expérience n'était pas significativement différente de la déviation moyenne mesurée pendant la réalisation des tâches mnésiques ni de la déviation mesurée pendant la tâche de répétition à la fin de l'expérience. Ainsi, l'exposition prolongée à la stimulation visuelle en mouvement n'a pas altéré la réponse posturale à la vection. Il n'y avait aucun effet d'interaction entre la condition d'environnement visuel et le moment de la mesure ($p = 0,39$). Lorsque tous les blocs sont pris en compte (i.e., double tâche avec la mémoire et la répétition), la différence entre le mouvement uniforme et non uniforme en termes de position moyenne du centre de pression sous les pieds reste significative ($F(1 ; 19) = 27,77 ; p < 0,05$).

- Sur l'axe antéro-postérieur, aucun effet principal de la stimulation visuelle ($p = 0,07$), ni de la tâche mnésique ($p = 0,67$) ni même d'interaction entre ces facteurs n'a été observé ($p = 0,55$).

Variance autour de la moyenne du centre de pression sous les pieds

- Sur l'axe médio-latéral, il y avait un effet principal de la condition de stimulation visuelle ($F(1 ; 19) = 9,85 ; p < 0,05$). La variance était plus importante lors de la présentation du mouvement uniforme ($\bar{m} = 19,10$ mm ; SE = 2,89) que durant la présentation du mouvement non uniforme ($\bar{m} = 15,59$ mm ; SE = 2,22). Aucun effet significatif du type de tâche mnésique sur la variance n'a été observé ($F(1 ; 19) = 0,34 ; p = 0,86$). Une interaction entre la condition de vision et le type de tâche mnésique a été mise en évidence ($F(1 ; 19) = 4,99 ; p < 0,05$). L'augmentation de la variance dans la condition de mouvement uniforme par rapport à la condition non uniforme était plus importante lorsque le participant réalisait en parallèle une tâche de mémoire épisodique que lorsqu'il réalisait une tâche de mémoire sémantique (voir Figure 15).

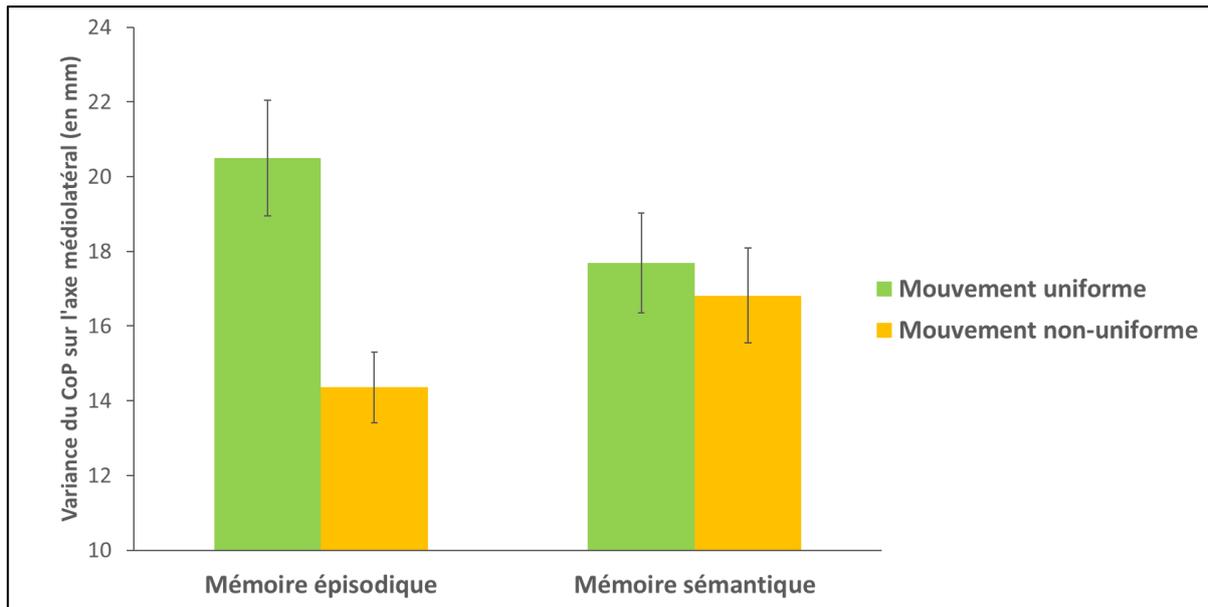


Figure 15 : Variance autour de la position moyenne du centre de pression sous les pieds sur l'axe médio-latéral en millimètres pour la tâche de mémoire épisodique et sémantique dans les deux conditions de mouvement visuel (i.e., uniforme et non uniforme). Les barres représentent l'erreur standard autour de la moyenne.

- Sur l'axe antéro-postérieur, aucun effet de la condition visuelle ($p = 0,07$), ni de la tâche mnésique ($p = 0,73$), ni d'interaction entre ces deux facteurs ($p = 0,44$) n'a été observé.

Entropie du signal postural

- Sur l'axe médio-latéral, il n'y avait aucun effet principal de la condition visuelle ($F(1 ; 19) = 0,16 ; p = 0,69$). À noter que la condition de mouvement visuel n'a aucun effet à lui seul sur l'entropie, comme mis en évidence dans l'Expérience 4. Aucun effet du type de tâche mnésique ($F(1 ; 19) = 3,45 ; p = 0,08$) n'a été mis en évidence. Il y avait cependant une interaction croisée entre ces deux facteurs ($F(1 ; 19) = 4,94 ; p < 0,05$). Dans la condition de mouvement uniforme, la posture était plus régulière (comme l'indique la diminution de l'entropie) pendant la tâche de mémoire épisodique. Dans la condition de mouvement non uniforme, aucune différence d'entropie n'a été mesurée en fonction de la tâche mnésique (voir Figure 16). L'absence d'effet principal de la tâche mnésique, associée à l'interaction mesurée, va dans le sens d'un statut particulier de l'association entre une tâche de mémoire épisodique et le traitement d'un mouvement visuel uniforme.

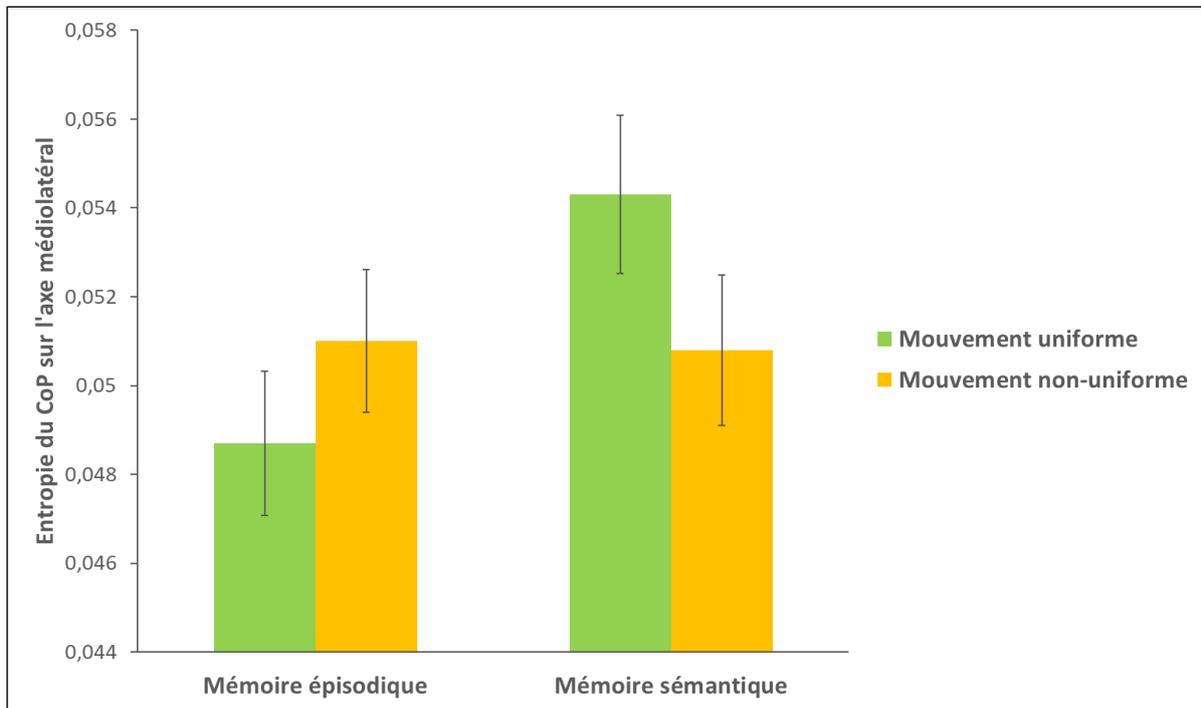


Figure 16 : Entropie du signal postural sur l'axe médio-latéral en millimètre pour la tâche de mémoire épisodique et sémantique dans les deux conditions de mouvement visuel (i.e., uniforme et non uniforme).

Les barres représentent l'erreur standard autour de la moyenne.

- Sur l'axe antéro-postérieur, un effet principal de la condition visuelle est mis en évidence ($F(1 ; 19) = 9,97 ; p < 0,05$). Les oscillations posturales sont plus régulières dans la condition de mouvement non uniforme que dans la condition de mouvement uniforme. Aucun effet principal du type de tâche mnésique ($p = 0,97$) ni d'interaction ($p = 0,67$) n'a été observé.

3. Analyses complémentaires

Les analyses présentées précédemment sont celles classiquement effectuées sur le signal postural recueilli lorsque le participant est face à une stimulation visuelle en mouvement uniforme. Pour pallier le non-respect de la condition de normalité de la variance (test de Shapiro-Wilk, $p < 0.05$), des tests non paramétriques ont été réalisés en complément. Les ANOVA de Friedman ont été utilisées pour les comparaisons impliquant plus de deux groupes. Pour les comparaisons par paire, le test de Wilcoxon a été utilisé. Pour les contrastes une correction de Bonferroni est appliquée lors des comparaisons post-hoc. Le seuil choisi est $p < 0,05$ et après correction, le seuil est porté à $p < 0,0125$.

- **Position moyenne du centre de pression sous les pieds** : sur l'axe médio-latéral, l'effet de la condition visuelle restait significatif ($\chi^2(3) = 21,06 ; p = 0,0001$). Le mouvement visuel uniforme générait une déviation dans le sens du mouvement que la condition

non uniforme ne générât pas ($Z > 3,47$; $p < 0,00052$). Il n'y avait pas d'effet de la tâche mnésique ($Z < 1,00$; $p > 0,31$). Une analyse supplémentaire a été conduite pour estimer un potentiel effet d'ordre. Nous avons comparé la déviation moyenne pour les deux conditions de vision, à la déviation mesurée pendant les blocs de répétition au début et à la fin de l'expérience (i.e., comparaison des trois phases, avant, pendant et après la double tâche). Aucun effet d'ordre n'a été observé (pour toutes les comparaisons, $Z > 3,91$; $p < 0,0035$). Sur l'axe antéro-postérieur, aucun effet n'est mis en évidence ($\chi^2(3) = 2,28$; $p = 0,52$).

- **Variance** : sur l'axe médio-latéral, un effet de la tâche mnésique a été mis en évidence ($\chi^2(3) = 11,7$; $p < 0,0085$). La tâche de mémoire épisodique engendrait une plus grande variance lors du mouvement visuel uniforme que lors du mouvement visuel non uniforme ($Z = 3,47$; $p = 0,00052$). Sur l'axe antéro-postérieur, aucune différence significative entre les conditions n'a été observée ($\chi^2(3) = 2,46$; $p = 0,48$).

- **Entropie** : Sur l'axe médio-latéral, l'ANOVA de Friedman était significative ($\chi^2(3) = 8,34$; $p < 0,039$). La tâche épisodique engendrait des déplacements du CoP plus réguliers pendant le mouvement uniforme par rapport au mouvement non uniforme ($Z = 2,54$; $p = 0,011$). Sur l'axe antéro-postérieur, les comparaisons post-hoc ne mettaient en évidence aucune différence significative entre les deux tâches mnésiques ($Z < 1,08$; $p > 0,28$) ni entre les conditions visuelles ($Z < 2,38$; $p > 0,017$).

Les effets d'intérêt restaient significatifs avec cette analyse non paramétrique, à savoir la déviation du centre de pression sous les pieds spécifique au mouvement uniforme, la modulation de la variance et de l'entropie pour la tâche de mémoire épisodique en fonction de la condition visuelle. Comme attendu, l'axe antéro-postérieur n'est pas celui sur lequel le mouvement visuel uniforme avait un effet.

E) Discussion

Le but de cette expérience était de mettre en évidence l'implication d'un processus spatial d'orientation pendant la remémoration épisodique. Nous nous sommes donc intéressés à l'interaction entre maintien postural et tâche mnésique face à un environnement visuel en mouvement angulaire uniforme car il est susceptible de modifier la perception de la verticale et plus généralement la perception de soi dans l'espace. Si un processus spatial est impliqué dans la remémoration épisodique, alors une modification des performances mnésiques et/ou posturales devrait être observée dans cette situation de double tâche. Ces variations, de la performance mnésique et du maintien postural, ne devraient pas s'observer pour une tâche de

mémoire sémantique car elle n'impliquerait pas de traitement spatial. Afin de différencier l'effet d'un simple mouvement dans le champ visuel, d'un effet du traitement de son orientation spatiale, nous avons utilisé un mouvement non uniforme ne générant ni illusion de mouvement de soi ni variation d'orientation dans l'espace. Comme dans l'Expérience 3 en vection assise, un effet d'interaction entre l'environnement visuel et le type de tâche mnésique était attendu. Bien que les performances mnésiques ne soutiennent pas cette hypothèse, les indicateurs posturaux mettent en évidence un statut particulier de la tâche de mémoire épisodique dans la modulation de la posture face aux environnements visuels en mouvement.

Une réplique des effets de l'environnement visuel sur le maintien postural

Nous répliquons les résultats de l'Expérience 4, avec la mise en évidence d'une déviation de la position moyenne du centre de pression sous les pieds, dans le sens du mouvement, spécifique au mouvement uniforme. Dans le cas du mouvement non uniforme, la position du participant ne dévie pas significativement par rapport à sa position de départ enregistrée face à un environnement visuel statique. Le temps d'exposition à la stimulation visuelle, quel que soit le type de mouvement, n'a pas impacté significativement les mesures posturales, tout comme dans l'expérience de Tanahashi et collaborateurs (2007). La déviation du centre de pression est comparable au début et à la fin de l'expérience suggérant qu'il n'y a pas de diminution de l'effet de l'environnement visuel en mouvement sur la posture. Il faut cependant souligner que l'exposition à la stimulation en mouvement était entrecoupée de pauses. Enfin, la déviation du centre de pression pendant la tâche de répétition (qui se déroule au début et à la fin de la phase en double tâche) ne diffère pas significativement de celle mesurée pendant les tâches mnésiques. Ainsi, la charge cognitive ne semble pas avoir d'impact sur cette mesure objective de l'orientation spatiale, contrairement aux effets observés sur les échelles d'auto-report de l'intensité de la vection (Seno et collaborateurs, 2011). Il faut cependant souligner que manipuler la charge associée à la tâche cognitive n'était pas le but premier de ce paradigme. Enfin, comme dans l'Expérience 4, la variabilité des oscillations posturales augmente pendant la présentation d'un mouvement uniforme par rapport à un mouvement non uniforme. Cette différence reste plus faible que celle rapportée par Tanahashi et collaborateurs (2007). Il faut cependant noter que leur paradigme ne contrôle pas pour la présence d'un simple mouvement dans le champ visuel, ce qui pourrait laisser penser que leurs résultats reflètent à la fois un effet du mouvement visuel et de la perturbation de l'orientation spatiale. Du côté de l'entropie, les résultats suggèrent que l'attention impliquée dans le contrôle postural est équivalente lors de la présentation du mouvement uniforme et du mouvement non uniforme.

Performances mnésiques

Les performances mnésiques ne mettent en évidence aucun effet d'interaction, que ce soit au niveau des bonnes réponses ou des temps de réponse. Le taux de bonnes réponses ne varie pas en fonction de l'environnement visuel. On peut suggérer que la diminution des performances observée que ce soit pour la mémoire épisodique ou sémantique dans l'Expérience 3 (environnement statique vs. en mouvement uniforme) serait davantage liée à la présence d'un mouvement dans l'environnement qu'à la vection en tant que telle. Si le temps de réponse ne varie pas en fonction de l'environnement visuel, il est plus long pour la tâche épisodique que pour la tâche sémantique, à l'inverse des expériences précédentes. L'ajout d'une condition statique, afin d'estimer le temps de réponse moyen en ne manipulant pas l'environnement visuel, nous aurait permis de mieux interpréter ce résultat. Les mesures de performances mnésiques en condition statique de l'Expérience 3 en position assise sont effectuées dans des conditions expérimentalement trop différentes pour pouvoir effectuer une comparaison directe avec les performances mesurées dans cette expérience. Une hypothèse que nous pourrions émettre concernerait un effet d'apprentissage. En effet, les essais étaient, dans cette expérience, regroupés par douze au lieu de six. Il est possible d'envisager que cette répétition profite à la tâche sémantique car elle pourrait permettre la mise en place de stratégies de résolution plus rapides pour cette tâche de comparaison d'objets. À l'inverse, pour la remémoration épisodique, la résolution de la tâche serait très peu affectée par le regroupement des essais, car la réussite ou l'échec d'un essai ne dépendrait que très peu de la mise en place d'une procédure à appliquer pour laquelle le sujet deviendrait de plus en plus rapide.

Maintien postural pendant le mouvement de l'environnement visuel : comparaison entre la tâche mnésique épisodique et sémantique

La posture semble être gérée de manière différente en fonction de la tâche mnésique, et ce, seulement en condition de mouvement uniforme. Les différences s'observent sur l'axe médio-latéral c'est-à-dire dans le plan parallèle à celui de la stimulation visuelle. Ainsi, la variance des oscillations posturales augmente en condition vection par rapport à la condition de mouvement non uniforme lors de la réalisation de la tâche épisodique. Cet effet du contexte visuel n'est pas observé en mémoire sémantique. L'augmentation de la variance est généralement interprétée comme une diminution de la stabilité posturale (Hufschmidt, Dichgans, Mauritz, & Hufschmidt, 1980; Maki, Holliday, & Fernie, 1990; Prieto et collaborateurs, 1996). Une détérioration de la stabilité posturale lors de la remémoration épisodique pourrait alors suggérer un partage de processus entre ces deux tâches. Cette

interprétation est corroborée par l'interaction entre tâche mnésique et environnement visuel mise à jour sur l'entropie. En effet, une diminution de ce paramètre est observée en condition vection et ce uniquement lors de la tâche de remémoration épisodique. Comme nous l'avons évoqué plus haut dans ce chapitre, une diminution de l'entropie correspond à une augmentation de la régularité du signal postural (prédictibilité des oscillations posturales). Il a été proposé une relation entre la régularité du CoP et la quantité d'attention investie dans le contrôle postural (Roerdink et collaborateurs, 2006), une augmentation de l'entropie indiquant que l'équilibre postural requiert moins d'attention (Stins et collaborateurs, 2009). En effet, une augmentation de la variabilité du signal postural a été observée chez les personnes âgées par rapport aux personnes jeunes (Potvin-Desrochers, Richer et Lajoie, 2017) mais également lors de la réalisation d'une tâche cognitive en parallèle du maintien postural en comparaison à une situation de simple tâche (Donker, Roerdink, Greven et Beek, 2007). Cette augmentation de la variabilité a été associée à une diminution de l'attention portée à la posture (Rhea, Diekfuss, Fairbrother et Raisbeck, 2019). Lorsque l'attention est éloignée de la posture (par exemple grâce à la réalisation d'une seconde tâche), la posture est maintenue de manière plus automatique (i.e., augmentation de l'irrégularité du signal postural), alors qu'une attention portée à la posture permet une gestion posturale par des processus cognitifs contrôlés (i.e., diminution de l'irrégularité, Wollacott et Shumway-Cook, 2002 ; Polskaia et collaborateurs, 2015). La diminution de l'entropie observée ici suggère que l'attention est en partie redirigée vers la posture lors de la réalisation de la tâche épisodique face à l'environnement visuel en mouvement uniforme. L'association de la tâche épisodique avec le mouvement uniforme engendre bien une difficulté supplémentaire dans le maintien de l'équilibre.

Interprétés simultanément, l'augmentation de la régularité de la posture (i.e., diminution de l'entropie) et l'augmentation de l'instabilité posturale (i.e., augmentation de la variance), lors de l'association du mouvement uniforme et de la tâche de mémoire épisodique, indiquent un contrôle postural inefficace (Donker et collaborateurs, 2007 ; Potvin-Desrochers et collaborateurs, 2017). Cette difficulté du maintien postural n'est pas observée lors de la réalisation de la tâche de mémoire sémantique.

En résumé, la mémoire épisodique et le contrôle postural semblent partager un processus de nature spatiale, car la perturbation de l'orientation spatiale grâce à la stimulation visuelle en mouvement uniforme en parallèle de la tâche de mémoire de source engendre une diminution de la stabilité posturale et une focalisation de l'attention sur le maintien de la posture. Ces deux effets ne s'observent ni lors du mouvement visuel non uniforme ni lors de la réalisation de la tâche sémantique. Cet effet de la stimulation visuelle uniforme peut difficilement être expliqué

par des ressources globales limitées, car il est spécifique à la tâche de remémoration épisodique et ne se retrouve pas pour la tâche de comparaison d'objet pourtant de difficulté équivalente, comme l'indique la similarité du pourcentage de bonnes réponses. Cet effet ne peut pas non plus s'expliquer par une différence d'attention nécessaire pour réaliser chaque tâche mnésique car aucun effet principal du type de tâche n'est mis en évidence sur l'entropie. De la même façon, cet effet ne peut pas être attribué à la présence d'une composante d'imagerie mentale. Si, selon la théorie de la construction de scènes, la remémoration nécessite la construction d'une image mentale de scènes, le jugement de similarité sur des critères de couleur et de forme nécessite également une image mentale des objets. Comme développé au début du Chapitre 3, les deux tâches se différencient cependant sur la composante spatiale accompagnant l'imagerie mentale. La théorie de la construction de scènes suppose qu'une scène à la première personne est construite grâce à une composante spatiale, qui sert de structure à la remémoration. Alors que la tâche de comparaison d'objets ne nécessite pas de traitement spatial à la première personne pour être réussie.

VIII- Conclusion du chapitre et perspectives

Les expériences présentées dans ce chapitre ont été conçues pour augmenter le recours au traitement de son orientation spatiale en parallèle de la réalisation d'une tâche mnésique. Ce processus d'orientation spatiale est supposé à l'œuvre en mémoire épisodique et joue un rôle dans le maintien postural. Cette manipulation ne semble cependant pas suffisante pour mettre en évidence une interaction entre le type de tâche mnésique et le type de stimulation visuelle au niveau des performances mnésiques. Néanmoins, une modulation des performances mnésiques indépendamment de la nature de la tâche mnésique est observée dans l'Expérience 3. En effet, nous avons pu mettre en évidence une diminution globale des performances mnésiques face au mouvement uniforme (en position assise) comparativement à l'absence de mouvement. Cependant, cette diminution des performances semble être liée à la présence d'un mouvement (en comparaison à un environnement visuel statique), car elle n'est pas répliquée lors de l'opposition entre un mouvement uniforme et un mouvement non uniforme (Expérience 5). Ainsi, la détérioration globale des performances serait davantage liée à la présence d'un mouvement dans le champ visuel lors de la réalisation de la tâche mnésique qu'à la perturbation de l'orientation spatiale induite par le mouvement visuel uniforme. Toutefois, la présence d'un processus d'orientation spatiale lors de la remémoration épisodique semble pouvoir être mise à jour sur la mesure posturale (Expérience 5). En effet, une modification des paramètres

posturaux en condition de vection est observée et ce uniquement pour la tâche de mémoire épisodique.

Si la remémoration épisodique nécessite un processus d'orientation spatiale, pourquoi ce partage de processus avec le maintien postural n'est-il pas mis en évidence via une modulation des performances à la tâche mnésique ? Il est possible de supposer que la précarisation du contrôle postural est nécessaire pour observer une modulation des performances à la tâche mnésique dans une tâche de maintien postural face à un environnement visuel en mouvement uniforme. Comme suggéré dans la littérature, la difficulté à maintenir l'équilibre peut avoir un effet sur les performances à la tâche mnésique (voir Chapitre 2). Pour augmenter encore la difficulté du maintien de l'équilibre, il faudrait envisager une position encore moins stable pour le participant face à la stimulation visuelle en mouvement. Par exemple, dans le cadre de la stimulation en roulis, nous avons mesuré de fortes oscillations sur l'axe médio-latéral, il faudrait alors utiliser une posture où les oscillations sur cet axe sont moins aisées, par exemple la posture en Romberg (i.e., les pieds sont positionnés l'un devant l'autre avec les orteils du pied en arrière touchant le talon du pied de devant). Cependant, cette situation peut générer des déséquilibres réels et l'analyse des données peut en être complexifiée. Les blocs pour lesquels le déséquilibre a été tel que le participant a changé la position de ses pieds (e.g., en écartant sur le côté le pied positionné à l'avant) afin de ne pas tomber sont exclus de l'analyse du signal postural. Le temps de mesure ayant un impact sur la majorité des indicateurs posturaux (voir le Chapitre 3) le moment du déséquilibre ne peut pas être simplement coupé (avec en plus la difficulté à définir le début et la fin de cet épisode de déséquilibre). De plus, la variation d'un mouvement comme un pas de côté, ou un mouvement de rééquilibration a une amplitude tellement importante par rapport aux variations d'intérêt (quelques millimètres seulement) que conserver ces mesures incluant un mouvement volontaire ne ferait que bruyé les indicateurs posturaux. Certains auteurs travaillant sur le contrôle postural chez les patients ou les personnes âgées s'intéressent aux chutes. Le choix de cette variable est intrinsèquement lié à la nature appliquée des recherches dont le but est le plus souvent de repérer les personnes à risque élevé de chute grâce à des mesures posturales en double tâche (Beauchet, Annweiler, Allali, Berrut, Herrmann, Dubost, 2008 ; Bayot et collaborateurs, 2020) et d'améliorer les performances dans les situations de double tâche grâce à des entraînements (You, Shetty, Jones, Shields, Yordanos et Brown, 2009 ; Ghai, Ghai, et Effenberg, 2017). Expérimentalement chez le sujet sain, la mesure du nombre de chutes pendant une situation de double tâche est moins pertinente car le nombre potentiel d'épisodes de déséquilibre est faible. Il est assez grand pour

restreindre drastiquement le nombre d'essais aux tâches mnésiques (avec la suppression d'un bloc due à un déséquilibre dans le paradigme précédent, nous perdrons 12 essais à la tâche cognitive) mais potentiellement trop faible pour qu'une différence entre tâches soit mise en évidence avec un nombre restreint de participants jeunes et sains. Il faut cependant souligner que la double tâche ne doit pas devenir trop complexe au risque de générer une diminution globale des performances. Autrement dit, si la situation expérimentale devient trop difficile elle ne sera pas assez sensible pour mettre en évidence des partages fins de processus et pourrait perturber les performances cognitives sans distinction de nature de la tâche.

En se tournant vers les limites des modèles de partages des ressources (générales ou spécifiques) entre posture et cognition, il est possible de concevoir quelques faiblesses de l'hypothèse selon laquelle les performances cognitives seront affectées seulement lors de l'augmentation de la difficulté de la situation de double tâche. En premier lieu, le lien entre la difficulté du maintien postural et la performance cognitive ne peut peut-être pas être conçu comme une relation linéaire. De plus, les modèles restent en majorité très dualistes, avec d'un côté la posture et de l'autre la cognition, ne supposant qu'une interaction au niveau des informations nécessaires pour réaliser l'une et l'autre ou de la limite humaine au niveau du traitement de l'information. Peu d'hypothèses portent sur les mécanismes de réalisation des tâches cognitives et du maintien de l'équilibre qui pourraient être communs. Même les expériences s'inspirant des modèles de cognition incarnée, supposant un impact de la posture sur la cognition raisonnent le plus souvent en partage de traitement des informations sensorielles. Par exemple, le mouvement visuel présenté à un impact sur la posture et le traitement postural aura un effet sur les souvenirs rappelés. Ainsi, le mouvement vers l'avant provoque une sensation de pencher vers l'arrière et cet état corporel (informations somesthésiques et proprioceptives) facilite l'accès aux souvenirs passés. De plus, les modèles de double tâche tiennent très peu compte de la vicariance posturale possible pour maintenir son équilibre, quelle que soit la position. Au contraire, les modèles du maintien postural en situation de simple tâche proposent d'expliquer et de prédire les modifications des indicateurs posturaux comme la fréquence des oscillations suite à des perturbations de l'environnement (e.g., mouvement de la plateforme de force, suppression de l'information visuelle...). Ce raisonnement en termes de vicariance (voir le Chapitre 3) pourrait être appliqué plus largement pour toutes les situations de double tâche où aucun déséquilibre réel n'est mesuré.

Nous avons déjà évoqué, dans le premier chapitre, la place du traitement de son corps dans l'espace du point de vue acteur lors de l'apprentissage sur les performances ultérieures en

mémoire épisodique. Les résultats de l'expérience 5 suggèrent que le traitement de l'orientation du corps dans l'espace pourrait également jouer un rôle important lors de la remémoration. À long terme, cette ligne de recherches peut avoir un intérêt applicatif concernant la pertinence des conditions de réalité virtuelle qui simulent le déplacement de l'individu dans son environnement (vection), pour l'évaluation de certaines compétences. De plus amples études sont nécessaires pour étudier plus précisément les conditions dans lesquelles la remémoration pourrait être perturbée. L'étude de l'impact d'une situation virtuelle sur l'efficacité de l'apprentissage est une question de recherche privilégiée dans le domaine des apprentissages car elle touche directement l'apport potentiel d'outils technologiques aux apprentissages tant chez l'enfant (e.g., avec l'acquisition de la lecture) que chez l'adulte (e.g., simulateur de conduite). Mais si la remémoration épisodique peut être perturbée par l'utilisation de processus d'orientation, intrinsèquement liés à la présentation d'informations visuelles en mouvement, la question du caractère additionnel de l'apprentissage en situation réelle et virtuelle peut être soulevée.

Chapitre 5 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES EXPERIMENTALES

I- Rappel de la problématique, principaux résultats et limites

Dans cette thèse, nous avons examiné l'aspect incarné de la remémoration en faisant l'hypothèse que le maintien postural et la remémoration épisodique partageraient des processus spatiaux d'orientation. Nous sommes partis du constat que la notion de *spatial* en mémoire épisodique est passée, petit à petit, d'une simple composante de l'épisode (e.g., l'événement s'est déroulé à la montagne) à un processus permettant la remémoration (i.e., la scène sert de charpente à la (re)construction du souvenir). L'implication d'un processus spatial en mémoire épisodique est soutenue, dans la littérature, par des expériences chez les patients amnésiques et des données d'imagerie cérébrale, suggérant un partage de réseaux entre la remémoration épisodique et la réalisation de tâches spatiales (e.g., navigation dans un environnement appris, reconnaissance de position d'objets dans un pattern appris). Toutefois, très peu de données comportementales chez le sujet jeune et sain sont disponibles. De plus, dans les tâches spatiales utilisées, une composante mnésique est présente, notamment avec l'apprentissage de la position des objets dans l'environnement.

Dans cette thèse, nous avons donc proposé d'utiliser la posture comme tâche spatiale d'orientation dans l'espace. Le principe du paradigme en double tâche a été repris des expériences disponibles dans la littérature, en remplaçant la tâche spatiale de localisation d'objets par le maintien postural. Deux avantages principaux inhérents à ce choix ont été abordés. Tout d'abord, la mesure posturale semble être à la fois sensible à la présence d'une tâche cognitive de nature spatiale et utilisée dans la littérature pour évaluer l'incarnation de certaines tâches cognitives. Ensuite, le caractère continu de la mesure pourrait permettre de mettre en évidence plus facilement l'interaction supposée. Ainsi, les expérimentations menées dans cette thèse mettent en évidence des variations des paramètres posturaux entre les situations de double tâche posture/mémoire épisodique et posture/mémoire sémantique, et ce que ce soit dans un environnement clément (Chapitre 3) ou déstabilisant (Chapitre 4). En accord avec les données de la littérature sur les tâches explicitement spatiales, ces résultats suggèrent une

implication de processus spatiaux en mémoire épisodique qui seraient partagés avec le maintien postural, et ce même lorsque le rappel n'implique pas la composante spatiale de l'épisode de manière explicite. Ce travail nous amène ainsi à aborder plusieurs dimensions. La première est le lien entre l'augmentation de l'implication des processus spatiaux et la notion de perturbation posturale censée la mettre en œuvre. La seconde concerne le problème de la mesure que ce soit pour la posture afin de dépasser la notion de réussite ou d'échec, ou pour la mémoire pour laquelle aucun effet différentiel entre tâche épisodique et tâche sémantique n'a été observé.

En ce qui concerne la notion de perturbation posturale, nous avons maximisé l'utilisation des processus spatiaux d'orientation grâce à la présentation d'un environnement visuel en mouvement angulaire uniforme (pouvant générer une vection). Le but était de perturber l'orientation spatiale du participant, mesurable grâce à la déviation posturale dans le sens du mouvement et à l'augmentation de la variance des oscillations. Si aucun effet différentiel de la vection n'a été mesuré sur les performances mnésiques (Expérience 4), les modifications posturales mettent en évidence une interaction entre la nature de la tâche mnésique et la condition visuelle dans laquelle a lieu le maintien postural (Expérience 5). Lors du mouvement angulaire uniforme, la remémoration épisodique engendre à la fois une diminution de la stabilité posturale et une refocalisation de l'attention sur la posture, modulations qui ne se mesurent pas lors de la réalisation de la tâche sémantique. Cette combinaison de facteurs est interprétée comme un maintien postural moins efficace par rapport au maintien postural mesuré pendant la réalisation de la tâche sémantique. Le partage de processus spatiaux d'orientation est supposé ici à l'origine de cette interaction.

Dans la littérature, l'association vection en roulis et tâches mnésiques n'a pas été étudiée. Néanmoins, Ehrenfried et collaborateurs (2003) présentent une stimulation visuelle en mouvement linéaire uniforme et demandent aux participants de réaliser une tâche de mémoire de travail. Bien que les performances cognitives diminuent dans la condition de mouvement visuel, aucune différence entre tâches spatiale et non spatiale n'est observée. Cependant, les auteurs ont présenté la stimulation visuelle pendant la phase d'encodage. L'hypothèse testée ici concerne la nature spatiale de la remémoration, aucune hypothèse n'est émise sur la phase d'encodage. D'autre part, la stimulation visuelle était un mouvement linéaire vers la droite. La vection circulaire et la vection linéaire diffèrent au niveau de la présence d'un conflit sensoriel. En effet, la vection circulaire en roulis induit un conflit visuo-otolithique. L'absence de changement dans la stimulation otolithique (interprétée comme une immobilité du corps) est incompatible avec la perception illusoire de rotation ou d'inclinaison (Tanahashi et

collaborateurs, 2012). La perception du mouvement en roulis nécessite que l'observateur ignore les entrées vestibulaires graviceptives indiquant que la tête est stationnaire (conflit visuo-otolithique, Thilo et Gresty, 2002), ce qui n'est pas le cas pour la vection linéaire (i.e., mouvement gauche-droite de l'environnement). En raison de ce conflit sensoriel, le mouvement de roulis visuel peut donc induire un niveau plus élevé de désorientation spatiale. Comme le conflit est de nature spatiale, il interférerait préférentiellement avec les tâches cognitives spatiales. L'opposition d'une condition de vection linéaire à une condition de vection en roulis pourrait accroître la compréhension des conditions nécessaires à la mesure d'une interférence entre une tâche de remémoration et le maintien postural. Cette opposition permettrait de souligner que l'interférence entre mémoire et posture est due à l'intensité de la désorientation spatiale et non uniquement à l'illusion de mouvement de soi.

Pour aller plus loin dans la perturbation des processus spatiaux d'orientation, il est possible de se questionner sur l'effet que pourrait avoir la désorientation spatiale au-delà du cadre de la vection. Dans le champ de recherche s'intéressant à la représentation en mémoire d'un environnement, les auteurs discutent de la désorientation géographique, autrement dit, le participant ne sait plus dire où il se situe dans l'environnement, et ne pourra plus indiquer où les objets se situent par rapport à lui. Par exemple, Wang et Spelke (1999) montrent qu'il est possible de perturber la mise à jour égocentrée et de provoquer une désorientation qui résulte en une absence totale de repère de sa localisation dans l'environnement. Cette absence de mise à jour de sa position dans l'espace pourrait libérer les processus spatiaux d'orientation de la tâche spatiale de pointage et les laisser disponibles pour la tâche mnésique. Provoquer une désorientation géographique pourrait être une piste dans la continuité du paradigme de double tâche (i.e., pointage d'objets et tâches mnésiques) proposé par Cerles et collaborateurs (2015). La libération des processus d'orientation en faveur de la remémoration engendrerait une meilleure performance en rappel de source.

Dans la littérature posturale, la désorientation est *spatiale* et non plus géographique. Il s'agit plus largement de perturber la perception qu'a l'individu de la position de son corps dans l'espace. La désorientation spatiale est un risque auquel sont confrontés les pilotes en aviation acrobatique ou les pilotes d'avions de chasse. Le but des recherches menées dans ce domaine est de comprendre l'impact de ces conditions physiologiques extrêmes sur les performances cognitives. Les résultats de plusieurs études tendent à montrer que les performances à toutes les tâches cognitives sont perturbées dans des conditions de désorientation spatiale générée sans induction visuelle (Sen, Yilmaz et Tore, 2003 ; Gresty, Golding, Le et Nightingale, 2008 ; Webb, Estrada et Kelley, 2012). Lorsqu'un désavantage de la tâche spatiale par rapport à la

tâche verbale est reporté, la tâche verbale peut également subir une dégradation des performances (Gresty, Waters, Bray, Bunday et Golding, 2003 ; Gresty et Golding, 2009). Ce pattern de résultats amène Webb et collaborateurs (2012) à interpréter ces données en faveur du *posture first principle*. Les auteurs postulent que les ressources seront toujours allouées à la réorientation spatiale et à la restabilisation, quelle que soit la tâche cognitive à résoudre en parallèle. Ainsi, la désorientation spatiale ne permettrait pas de supprimer le recours à des processus spatiaux d'orientation, comme supposé dans la désorientation géographique, mais serait au contraire une condition dans laquelle leur utilisation est maximisée. Bien que l'anxiété associée à cet état de désorientation spatiale soit supposée impacter encore plus négativement les performances cognitives en situation réelle, Gresty et Golding (2009) soulignent que les performances cognitives se dégradent même lorsque l'individu n'est pas conscient du fait qu'il est désorienté.

Malgré les difficultés opérationnelles liées à la mise en œuvre d'une situation de désorientation spatiale, la dégradation des performances cognitives lors de la désorientation garde une pertinence particulière dans le cadre de la théorie de la cognition incarnée et située. En effet, cette manipulation de la désorientation spatiale est directement reliée à l'hypothèse de la remémoration comme une construction de scènes, avec l'idée qu'il est plus aisé de se (re)situer dans un contexte spatio-temporel passé s'il ne faut pas gérer en parallèle son orientation dans l'environnement spatial actuel.

En ce qui concerne la mesure des oscillations posturales, l'hypothèse que la remémoration est un voyage mental dans l'espace (et le temps) nécessitant des processus spatiaux d'orientation (similaires à ceux mis en jeu dans l'orientation dans l'espace physique réel), permet de supposer qu'un déséquilibre postural aura lieu lors de la remémoration épisodique. Au départ, les analyses posturales exploratoires se concentrent donc sur des indicateurs d'un moins bon maintien de l'équilibre (i.e., surface, variance). Ces indicateurs sont utilisés pour mettre en évidence de plus larges oscillations posturales, et interprétés dans le sens où un déséquilibre serait marqué par une augmentation de la surface (ou de la variance) dans laquelle l'équilibration a lieu. Si les résultats présentés au Chapitre 4 ne mettent en évidence aucun effet de la situation de double tâche sur la performance mnésique, ils tendent néanmoins à montrer que le maintien de l'équilibre est différent entre les deux tâches mnésiques. La posture peut être conceptualisée de manière binaire avec la notion de réussite (i.e., maintien de l'équilibre, très faibles oscillations posturales) et d'échec (i.e., déséquilibres, chutes, ou augmentation des oscillations posturales). Cette interprétation est très présente dans la

littérature de la double tâche avec la notion d'interférence qui sous-entend qu'une des deux tâches est échouée tandis que l'autre est priorisée. Cependant, un nombre croissant de travaux mettent en évidence la flexibilité du maintien postural (e.g., repondération sensorielle). Par exemple, une priorisation de l'une ou l'autre tâche est possible en fonction des consignes (Plummer, 2019) ou de l'environnement (Kelly, Eusterbrock et Shumway-Cook, 2014). De plus, différents modes de maintien de l'équilibre sont possibles (i.e., automatique vs. contrôlé).

Il devient alors intéressant de regarder plus finement les modulations du signal postural pour avoir accès aux stratégies mises en œuvre pour maintenir la posture. L'interférence n'est donc plus conçue comme une diminution de performance, mais comme un changement de stratégies dans la résolution des tâches lorsqu'elles sont réalisées simultanément. Chaque tâche ayant son propre but, elles ne pourraient pas se baser sur le même processus pour être résolues. Ainsi, dans l'Expérience 2, l'intérêt se tourne vers des indicateurs de composition fréquentielle du signal qui permet d'évaluer sur quelles informations sensorielles se base le maintien de l'équilibre. La multitude des indicateurs posturaux dérivables de l'enregistrement posturographique nécessite un choix préalable en fonction de l'hypothèse testée. La vicariance du signal postural peut être conceptualisée comme une repondération des informations sensorielles à l'origine du maintien de l'équilibre, ce qui rend les indicateurs fréquents intéressants. L'interprétation des paramètres posturaux se fait toujours par comparaison de plusieurs conditions expérimentales et non pas par rapport à une valeur de base pour le paramètre. En effet, en plus des différences interindividuelles importantes, la posture est sensible à l'environnement expérimental, ce qui rend ardue la définition chiffrée de ce que serait une posture *normale*. La posture est une mesure intéressante de par le reflet de l'interaction individu-environnement qu'elle permet, mais également une mesure contraignante, car il est nécessaire de l'appréhender comme une tâche à part entière.

En ce qui concerne la mesure mnésique, l'hypothèse d'interférence émise au départ supposait que la situation de double tâche puisse également avoir un effet sur les performances cognitives. Les Expériences 1 et 3 ont été construites dans le but de mettre en évidence une dégradation des performances spécifique à la tâche de remémoration. Dans cette thèse, aucun effet d'interaction n'est mis en évidence sur les tâches mnésiques. Autrement dit, nous n'avons pas réussi à mettre en évidence une dégradation des performances de remémoration épisodique et un maintien des performances à la tâche de mémoire sémantique grâce à la manipulation des conditions posturales.

Il est important de souligner que l'hypothèse d'un effet différentiel de la situation de double tâche sur les performances aux deux tâches mnésiques ne signifie pas que la mémoire épisodique et la mémoire sémantique soient deux systèmes distincts ou indépendants. De la même manière, l'observation d'une dégradation des performances mnésiques, quelle que soit la nature de la tâche lors de la présentation de l'environnement visuel en mouvement (Expérience 3), ne signifie pas que le rappel de source et le jugement de similarité repose sur un système mnésique unique. La question de l'unicité ou de la pluralité des systèmes mnésiques est une question récurrente dans la littérature qui est encore débattue. La théorie de la construction de scènes propose que le processus à l'œuvre lors de la remémoration épisodique sous-tende également d'autres tâches telles que la navigation mentale ou la perception de scènes. Cette mise en avant du processus de résolution permet de s'interroger sur la proximité des tâches entre elles, et ainsi s'écarter de la classification classique tâches mnésiques/tâches spatiales. Autrement dit, ce raisonnement permet d'envisager une ressemblance des processus sous-tendant la résolution des tâches impliquant un aspect scénique même si elles étaient auparavant considérées comme des tâches dépendant de systèmes et de processus de résolutions distincts. Cette théorie, mais également les résultats qui vont dans ce sens, bousculent la catégorisation classique des tâches cognitives. Il est maintenant envisageable qu'une tâche de remémoration ressemble plus à une tâche de perception de scènes qu'à une tâche de mémoire sémantique. La mémoire, qui était un concept regroupant toutes les tâches faisant appel au passé, peut être repensée en ajoutant une notion de spatialité. De plus, si l'on ajoute la question de la fonction, de l'utilité de la remémoration dans un environnement changeant et complexe, il est possible de se rapprocher de la notion de construction comme le supposait déjà Bartlett en 1932. Il ne s'agirait donc plus d'encoder et de maintenir de l'information dans le seul but de la rappeler ultérieurement. Le but serait plutôt d'interagir de manière adaptée avec l'environnement actuel qui est différent de l'environnement passé. Dans ce cas, des processus communs à la perception, à la remémoration et à la projection dans le futur sont alors envisageables.

Il faut souligner que c'est un effet spécifique à la remémoration épisodique que nous souhaitons mettre en évidence ici et que la diminution des performances aux deux tâches mnésiques lors de la présentation de l'environnement visuel en mouvement (Expérience 3) ne soutient pas l'hypothèse d'un partage de processus entre remémoration et orientation spatiale. Ce résultat est tout de même encourageant, car il montre qu'il est possible d'impacter les performances mnésiques grâce à des manipulations environnementales. Ce résultat souligne

cependant que l'obtention d'un effet différentiel en fonction de la nature de la tâche nécessite une manipulation plus fine, qui modulerait spécifiquement le recours à des processus d'orientation spatiale, mais sans atteindre un état de désorientation qui affecte négativement les performances cognitives indépendamment de leur nature. La difficulté à moduler les performances mnésiques n'est pas spécifique à la situation de double tâche posture-cognition. Iani (2019) présente une revue de la littérature centrée sur les résultats en faveur d'une implication de processus sensori-moteurs en mémoire épisodique. Il présente alors le modèle sensori-moteur (*sensorimotor model*) qui suppose que le rappel serait une simulation mentale d'expériences sensori-motrices. En faveur de cette hypothèse, effectuer un geste non congruent avec le contenu à rappeler augmente le temps de rappel. Ce résultat est interprété comme une impossibilité de réenactiver le processus sensori-moteur lors du rappel. Ainsi, le réseau utilisé pour faire le mouvement réel serait également celui nécessaire pour simuler la composante motrice du souvenir ce qui générerait l'interférence. Iani (2019) souligne cependant que les manipulations corporelles n'empêchent pas le rappel des souvenirs, autrement dit, le pourcentage de bonnes réponses n'est pas impacté par les manipulations corporelles. Ces données seraient alors en faveur d'une nature mixte du souvenir : sensori-moteur, mais avec un noyau d'une autre nature qui serait accessible lorsque la simulation sensori-motrice est rendue impossible par la situation expérimentale. La nature mixte du souvenir est supposée pour expliquer la réussite du rappel lors de l'occupation du réseau moteur par une seconde tâche motrice. Pour Iani (2019), la preuve ultime de l'implication d'un processus sensori-moteur (et non pas une composante sensori-motrice) en mémoire serait donc la modification de la sensation de revivre l'événement suite à une manipulation corporelle. Ce qui pourrait être le marqueur d'un changement de stratégie de rappel, avec par exemple un recours à de l'élaboration sémantique pour répondre.

Le rappel pourrait rester possible suite à des manipulations corporelles, non pas parce qu'une composante amodale et abstraite est disponible, mais parce que la simulation (ré-énactation) se ferait en parallèle de la planification du mouvement. Cependant, la simulation serait moins efficiente, ce qui expliquerait l'augmentation du temps de réponse. Il est également possible de supposer que c'est le mouvement qui a été modulé par la situation de double tâche et pas la remémoration. Comme pour la vicariance posturale dans le cadre de la double tâche mémoire et posture, il serait possible d'envisager que le mouvement réel effectué en parallèle de la remémoration ait des caractéristiques motrices différentes du même mouvement effectué en simple tâche, bien que le but soit atteint dans les deux cas (e.g., saisir un objet). Il serait alors intéressant de mesurer par exemple des paramètres indiquant la précision du mouvement ou

l'activation musculaire. Nous retrouvons de nouveau la limite, évoquée plus haut, à proposer des situations de double tâche ne permettant qu'une interprétation en termes de réussite ou d'échec. Il faut alors envisager d'autres variables dépendantes, capables de saisir des variations dans un même comportement. Il ne s'agit en aucun cas d'avoir un instrument de mesure plus précis. Par exemple dans le cas de la posture, cela s'illustre par le passage d'un indicateur de déstabilisation à un indicateur du contenu fréquentiel du signal qui se calculent, tous deux, sur la base du même signal postural. Nous discuterons dans la seconde partie de ce Chapitre, l'intérêt de mettre en place d'autres mesures de la remémoration épisodique pour avoir accès aux moyens mis en œuvre pour rappeler et plus seulement évaluer l'exactitude de la réponse.

Dans la littérature, complexifier le maintien de l'équilibre est une manipulation permettant de détériorer les performances à diverses tâches cognitives. Il reste cependant intéressant de tester des situations de double tâche sans menacer l'équilibre. Stins et Beek (2012) soulignent que le risque de déséquilibre pourrait encourager un contrôle conscient de la posture qui nécessite des ressources attentionnelles et que l'interférence posture-cognition serait alors le reflet d'un partage de ressources générales. Ces situations de double tâche ne seraient alors pas une preuve en faveur de la pénétrabilité de la posture par la cognition. Pour illustrer cette position théorique, les auteurs proposent de prendre l'exemple de la respiration qui est une activité automatique. La respiration est modulée avec l'état émotionnel, mais aussi avec la préparation à une activité physique, mais il n'est pas proposé que la respiration soit cognitivement pénétrable. Les auteurs insistent alors sur le fait qu'il serait plus pertinent d'envisager que la respiration soit une activité flexible qui peut s'adapter aux demandes de la situation. Ainsi, si la respiration est contrainte, par exemple respirer en fonction d'un métronome, la demande attentionnelle associée à cette tâche pourrait dégrader les performances à une seconde tâche cognitive. Cependant, il ne serait pas pertinent de conclure que la respiration est une activité qui demande de l'attention, car ce serait la contrainte de respirer avec un rythme non naturel qui demanderait des ressources attentionnelles. Il est possible d'avoir le même raisonnement avec le contrôle postural. S'il peut être automatique et flexible dans une situation naturelle de maintien de l'équilibre, il pourrait demander des ressources attentionnelles supplémentaires lors d'un risque accru de chutes ou de déséquilibres. Cette situation expérimentale ne serait donc pas informative du contrôle postural naturel. La vicariance mise en évidence dans l'Expérience 2 devient d'autant plus intéressante que la posture n'est en aucun cas menacée pendant la situation de double tâche.

La perturbation posturale n'en reste pas moins un axe de recherche intéressant, mais n'adresse pas les mêmes problématiques. Elle peut être utilisée pour mettre en jeu des processus de rééquilibration. Par exemple, en faisant bouger la plateforme par intermittence en lui faisant subir des mouvements, temporellement courts et de faibles amplitudes, vers l'avant ou vers l'arrière. L'hypothèse pourrait alors concerner les modalités de retour à l'équilibre et plus seulement la dégradation des performances mnésiques. Ainsi, il serait supposé que la rééquilibration (i.e., le retour à l'état qui précède la perturbation physique) serait différente en fonction de la tâche mnésique effectuée en parallèle (e.g., temps plus long). Des perturbations continues sont également envisageables avec un mouvement oscillatoire de la plateforme vers l'avant et l'arrière, tout en faisant varier l'amplitude et la vitesse du déplacement pour limiter les effets d'apprentissage. Il faut cependant souligner que les indicateurs d'intérêt qui sont extraits du signal postural sont différents de ceux utilisés lorsque la plateforme est fixe. Par ailleurs, tout comme dans le cas de la désorientation, il faut être vigilant sur la nature de la perturbation. De plus, si la perturbation est trop importante, il pourrait être impossible de mettre en évidence un effet différentiel en fonction du type de tâche, avec la possibilité que les ressources soient allouées en priorité à la rééquilibration.

Pour résumer, la situation de double tâche mémoire-posture est prometteuse et de nombreuses variantes au paradigme proposé ici restent à explorer. La posture semble être une mesure reflétant l'interaction entre l'individu et l'environnement qui permet d'évaluer l'incarnation de processus cognitifs. Ainsi, il semblerait intéressant d'évaluer la sensibilité de la mesure posturale au processus de construction de scènes en tant que tel. Dans la seconde partie de ce Chapitre, nous nous intéresserons tout d'abord à l'évaluation de la sensibilité du signal postural au processus de construction de scènes, sans passer par la réalisation d'une tâche mnésique. Ensuite, nous explorerons les possibilités qui s'offrent à nous pour évaluer comportementalement la présence d'un processus de construction de scènes pendant la remémoration épisodique. Enfin, nous terminerons sur l'intérêt de diversifier les mesures de la remémoration épisodique, notamment avec une évaluation qualitative du rappel. Cette dernière partie nous permettra de revenir sur la notion d'interférence comme contraignant la flexibilité des processus mis en œuvre pour résoudre chacune des deux tâches en parallèle.

II- Perspectives expérimentales

A) Existe-t-il un profil postural spécifique de la présence d'une construction de scènes ?

La littérature s'est intéressée au réseau cérébral sous-tendant la construction de scènes (McCormick et Maguire, 2021) dans le but de pouvoir par la suite évaluer l'implication de ce réseau dans diverses autres tâches cognitives (e.g., navigation, Maguire, 2001 ; théorie de l'esprit, Spreng, Mar et Kim, 2009). Hassabis, Kumaran et Maguire (2007) ont mis en évidence l'activation de deux réseaux distincts lors de l'imagerie d'objets et de l'imagerie d'une scène. Pour définir opérationnellement ce qu'est une scène, Summerfield, Hassabis et Maguire (2010) proposent de découper le processus de construction de scènes pour mieux comprendre la transition entre l'imagerie mentale d'un objet et l'imagerie mentale d'une scène (qui comporte plusieurs objets). Les résultats montrent que trois objets suffisent pour construire une scène. Tout d'abord, l'activation du réseau évolue jusqu'à l'ajout du troisième objet et ensuite reflète plus une implication de l'attention et de la mémoire de travail. Par ailleurs, les évaluations subjectives de prégnance et d'unicité de la scène sont les plus élevées lorsque 3 objets sont intégrés dans l'imagerie. Les ajouts des objets suivants (i.e., du quatrième au sixième objet) sont plutôt appréhendés comme un enrichissement de la scène existante.

La construction de scènes semble donc sous-tendue par un réseau distribué, mais qui lui est propre. Par la suite, Dalton, Zeidman, McCormick et Maguire (2018) ont adressé la question du rôle de l'hippocampe en opposant la construction de scènes à l'imagerie d'objets, mais également à une condition d'association (faisant référence à la théorie du rôle associatif de l'hippocampe dans l'intégration d'éléments multiples). Les résultats mettent en évidence l'implication de deux sous parties distinctes de l'hippocampe dans la condition de construction de scènes et dans la condition d'association d'objets. La principale différence entre ces deux conditions est la présence d'une troisième dimension lors de la construction de scènes. Il est intéressant de souligner qu'imaginer une grille en trois dimensions ne génère pas l'activation du réseau de construction de scène. La troisième dimension est donc une caractéristique importante tout comme la présence d'objets, mais les objets, comme la grille en trois dimensions, n'impliquent pas le réseau de construction de scènes lorsqu'ils sont imaginés séparément.

L'augmentation de la définition temporelle et spatiale des mesures de l'activité cérébrale ne permettra peut-être pas une meilleure compréhension de la cognition et pourrait engendrer

une vision encore plus hétérogène des structures comme l'hippocampe, avec l'idée que de nombreux traitements différents seraient à l'œuvre dans chaque zone, qui seraient alors indépendantes les unes des autres. C'est ce que concluent Dalton, Zeidman, McCormick et Maguire (2018). Il semble pertinent de poursuivre dans le sens de la complémentarité des mesures comportementales et des mesures d'imagerie dans la compréhension des comportements humains. Il serait donc intéressant d'évaluer la posture comme indicateur de la présence d'une construction de scènes. Nous proposons de reprendre et d'adapter le paradigme expérimental de Dalton et collaborateurs (2018) à la mesure posturale et d'opposer la construction de scènes à l'association d'objets. Une scène est définie comme un ensemble d'objets cohérent perçu à la première personne dans un environnement naturel en trois dimensions. Nous proposons donc d'opposer une situation dans laquelle le participant devrait positionner quatre objets dans un hangar vide comme s'il se tenait à l'entrée de ce hangar (i.e., environnement en trois dimensions) à une situation dans laquelle le participant devrait également positionner quatre objets mais sur une ardoise (i.e., positionnement centré sur le référentiel objet). Le contexte serait présenté au début de chaque essai et les objets seraient énoncés oralement séquentiellement. Comme dans l'expérience de Summerfield et collaborateurs (2010) des évaluations en termes de vivacité de l'imagerie, de sa cohérence spatiale et de la difficulté seraient demandées. La posture debout (en position clémente) serait mesurée pendant l'imagerie mentale. Il serait ainsi possible de comparer les caractéristiques du signal postural avec les caractéristiques du signal obtenu lors de la remémoration épisodique. Par exemple, la construction de scènes engendre-t-elle un pattern d'oscillations posturales différent (notamment une plus faible vitesse) en comparaison avec une construction spatiale centrée sur l'objet, comme nous l'avons observé lors de la comparaison entre remémoration épisodique et tâche sémantique (Chapitre 3) ?

Pour conclure, l'opposition imagerie d'objets versus imagerie de scènes contextualisées n'a jamais été testée grâce à la mesure posturale. Cette opposition est intéressante, car elle permet d'évaluer l'interférence lors de l'association posture-cognition, avec des tâches cognitives non mnésiques qui feraient cependant appel au processus de construction de scènes. Il est alors envisageable d'élargir ce paradigme à d'autres tâches comme la navigation et la projection dans le futur.

B) Un processus spatial de construction de scènes sous-tend-il la remémoration épisodique ? Réflexions autour de l'élaboration d'un paradigme comportemental

Les expériences présentées dans cette thèse suggèrent l'implication d'un processus spatial d'orientation lors de la remémoration épisodique. Pour aller plus loin, il serait intéressant de tester si ce processus spatial est de type reconstruction de scènes. La théorie de la construction de scènes a été principalement étudiée via des études en imagerie, principalement en IRMf. La création d'un paradigme expérimental de type comportemental visant à tester cette théorie chez les jeunes adultes sains permettrait d'élargir le faisceau de preuves en faveur de cette théorie. En effet, un partage de réseaux entre tâches spatiales et remémoration n'implique pas nécessairement une notion de (re)construction comme nous l'avons abordé dans le Chapitre 1 avec les théories telles que la carte cognitive ou la simulation épisodique par exemple. La théorie de la construction de scènes postule que l'environnement spatial du souvenir servirait de base à la (re)construction de tous les autres éléments de l'épisode, quelle que soit leur nature. Ainsi, mettre en évidence une modification du rappel des composants non spatiaux de l'épisode (e.g., quoi ? qui ?) lors d'une manipulation de la composante spatiale de l'épisode (i.e., le contexte d'apprentissage) serait une preuve en faveur de la construction de scènes.

Un impact des informations temporelles sur le rappel a déjà été mis en évidence dans la littérature. Par exemple, les premiers mots d'une liste sont souvent rappelés en premier. Clark et Bruno (2021) mettent en évidence un effet de la contiguïté temporelle des éléments à rappeler, ce qui irait dans le sens d'une organisation temporelle des éléments en mémoire. Autrement dit, le rappel (ou l'indigage) d'un élément entraîne le rappel des éléments présentés proche de lui dans le temps au moment de l'apprentissage. De plus, lorsque la procédure expérimentale vise à contraindre l'organisation en mémoire des différents éléments vers une organisation spatiale, en demandant de rappeler à la fois l'objet et son emplacement sur l'écran, le rappel reste indéniablement guidé par l'information temporelle. Ces résultats sont hautement compatibles avec la notion de stockage puis de récupération de l'épisode à l'identique. Cependant, les stimuli sont présentés séquentiellement, ce qui pourrait expliquer la prépondérance des informations temporelles en mémoire dans ce cas. En effet, l'information temporelle permet parfaitement, dans le cadre d'une présentation séquentielle, de ségréguer les différentes informations. Cependant, lorsque l'information est simultanée, comme c'est le cas naturellement, en partie à cause de la nature de notre perception (la vision est largement

simultanée, et les informations recueillies par nos différents sens sont intégrées), l'information qui devient pertinente pour la ségrégation pourrait être l'information spatiale.

Le but serait de mettre en place un apprentissage incident de plusieurs scènes (i.e., contexte spatial en 3 dimensions perçu à la première personne) dans lesquelles les objets cibles seraient disposés. La présentation des objets ne serait pas séquentielle et la tâche ne serait pas présentée comme une tâche de mémorisation. Le contenu spatial de la scène (i.e., le contexte sans les objets cibles) servirait ensuite d'indice pour rappeler les objets présents dans cette pièce. L'intérêt serait alors de faire varier le point de vue duquel est présentée la scène pour évaluer l'impact de cette manipulation sur le rappel des objets. Le point de vue serait à la fois un indice permettant de désigner la scène dont les objets doivent être rappelés, mais également un amorçage sur un point de vue particulier pour cette scène. Si l'information spatiale sert de base au rappel des autres composants du souvenir comme le suppose la théorie de la construction de scènes, moduler le point de vue devrait moduler le rappel des autres composants. L'hypothèse concerne l'ordre de rappel, avec l'idée que la construction se basera sur l'indice spatial et que les objets seront rappelés selon l'ordre dans lequel ils apparaîtraient sur l'image s'ils étaient présents. La manipulation du point de vue selon lequel la scène est indiquée pendant le rappel requiert une présentation de l'environnement à l'apprentissage sous forme de film pour que tous les points de vue soient expérimentés et que le rappel ne profite pas d'un effet de congruence de point de vue avec l'apprentissage dans une condition et pas dans l'autre. La seconde contrainte expérimentale consiste en une manipulation de l'indice spatial en intersujets.

Le défi lancé par un tel paradigme est double, comme nous avons pu le constater dans nos expériences préliminaires. En premier lieu, il faut sélectionner une analyse statistique qui permet de traiter l'ordre de rappel et de comparer deux ordres, même s'ils contiennent un nombre différent d'objets rappelés. Ensuite, il faudrait pouvoir établir un ordre de rappel idéal auquel comparer le rappel réel. Si la remémoration ne dépend pas de la construction de scènes, il est possible de supposer que les objets seront rappelés dans l'ordre de présentation. Cet ordre peut être établi à partir de la vidéo de présentation des objets. En revanche, l'ordre attendu, si la remémoration se base sur la construction de scènes, est plus délicat à définir. La théorie de la construction de scènes fait le parallèle entre la remémoration et la perception de scènes (Zeidman, Mullally et Maguire, 2015). Ainsi, il serait possible de se baser sur les caractéristiques de l'exploration d'une scène visuelle pour définir l'ordre de rappel des objets. Un biais vers la gauche de la première saccade est couramment observé lors de l'exploration de

scènes naturelles en eye-tracking. Par exemple, Nuthmann et Matthias (2014) mettent en évidence une déviation du regard vers la gauche au début de l'exploration d'une scène chez des sujets sains. Cette tendance à explorer d'abord vers la gauche est présente même lorsque la tâche consiste à détecter un objet qui est positionné sur la droite. Ce biais attentionnel vers la gauche est présent chez le sujet sain en mémoire, avec une meilleure mémorisation des éléments sur la gauche (Dickinson et Intraub, 2009), en imagerie mentale (McGeorge, Beschin, Colnaghi, Rusconi et Della Sala, 2007) et en rappel immédiat de caractéristiques visuelles (Della Sala, Darling et Logie, 2010). Il est ainsi possible de supposer que les objets rappelés en premier seront ceux positionnés à gauche selon le point de vue indice et varieraient donc en fonction du point de vue présenté.

C) Le paradigme de Remember-Know comme indicateur de l'épisodicité ?

Dans les expériences présentées dans cette thèse, la tâche de mémoire de source a été choisie afin de maximiser le recours à un processus de remémoration épisodique, plutôt qu'à la familiarité. Le paradigme de *Remember-Know* est très souvent utilisé pour dissocier les deux types de réponses, notamment lors d'hypothèses d'un effet spécifique à la remémoration épisodique. Dans le paradigme de double tâche présenté ici, l'évaluation de l'aspect qualitatif du rappel pourrait être intéressante pour deux raisons. Tout d'abord, selon l'hypothèse défendue dans cette thèse, l'interférence générée par la posture doit être spécifique à la remémoration épisodique, c'est-à-dire aux items ayant nécessité une construction de scènes (processus supposé ici comme sous-tendant la remémoration). Ainsi, la diminution de performance attendue dans les Expériences 2 et 3 pourrait en fait se traduire par une diminution des réponses *remember* lorsque les processus spatiaux d'orientation sont davantage mis en jeu dans le maintien postural. Cette dissociation serait également intéressante dans l'évaluation des temps de réponse, avec l'hypothèse que, si seule la remémoration épisodique partage des processus spatiaux avec le maintien postural, le temps de réponse des essais *remember* seront allongés. Autrement dit, la situation de double tâche pourrait perturber la construction de scènes, soit en diminuant l'efficacité de la remémoration épisodique (i.e., augmentation des temps de réponse pour les réponses *remember* uniquement) soit en imposant le recours à d'autres processus (i.e., diminution du nombre de réponses *remember*). Il est possible d'envisager que la situation de double tâche ait modulé l'épisodicité du rappel et non pas la capacité à rappeler la source (voir Mickes, Seale-Carlisle et Wixted, 2013 pour des réponses *know* associées à un rappel libre dont

la source est correctement rappelée). Nous supposons, en accord avec de la littérature, que le rappel de source maximiserait les réponses associées à un souvenir du contexte et minimiserait les réponses basées sur la familiarité. Néanmoins, aucune interaction que ce soit sur le pourcentage de bonnes réponses ou les temps de réponse n'a été observée sur les performances mnésiques. Nous suggérons qu'une prolongation pertinente du paradigme utilisé dans ce travail consisterait à inclure explicitement une dimension qualitative du rappel avec une procédure de *Remember-Know*.

Dans cette thèse, le fait que cette dimension n'ait pas été incluse est lié aux contraintes de la mesure posturale. Tout d'abord, les réponses verbales pendant la mesure posturale ont un effet sur les indicateurs posturaux. Avec l'ajout de cette qualification du rappel, la tâche épisodique nécessitera plus d'articulation que la tâche sémantique. Toutes les différences mises en évidence entre ces deux conditions pourraient alors être expliquées par la présence de verbalisation plus importante pour le rappel de source. Il pourrait alors être envisagé de qualifier le rappel en dehors des moments d'enregistrement de la posture. Dans le paradigme expérimental proposé ici, la qualification de la remémoration à la fin de l'enregistrement postural concernerait plusieurs essais (i.e., six ou douze en fonction des expériences). Différer l'évaluation qualitative du rappel complexifie la tâche de remémoration et ajoute potentiellement une composante mnésique à la tâche (i.e., maintien des qualificatifs de la remémoration pour chaque essai). Il serait possible d'envisager un enregistrement postural par essai pour supprimer cette problématique. Cependant, le traitement du signal postural sur quelques secondes d'enregistrement ne permet pas une analyse précise des stratégies posturales. La littérature suggère qu'à partir de trente secondes d'enregistrement l'analyse devient fiable (LeClair et Riach, 1996). Ne demander qu'un seul rappel de source pendant trente secondes de mesure posturale est prendre le risque de diminuer le rapport signal sur bruit, dans le sens où seule une petite partie du signal postural sera influencée par le processus sous-tendant la remémoration. Ces contraintes méthodologiques liées à la phase de récupération ne sont pas nouvelles et pourraient expliquer l'orientation des études dans le domaine de la double tâche posture-mémoire vers l'évaluation de l'encodage et du maintien de l'information.

Avec les indices d'une implication spécifique des processus spatiaux d'orientation apportés par les expériences présentées dans cette thèse, il serait possible de s'extraire de l'opposition tâche épisodique/tâche sémantique pour ne proposer qu'une tâche de rappel de source associée à un paradigme de *Remember-Know*. Ainsi, une opposition des réponses *know* aux réponses *remember* permettrait de s'extraire des contraintes énoncées précédemment et

d'étudier plus finement les modulations posturales spécifiques à la remémoration épisodique. Une comparaison en intersujets, opposant les participants ayant donné plus de réponses *Remember* à ceux ayant donné plus de réponses *Know*, est peu pertinente, tout d'abord à cause des variabilités posturales entre les individus. De plus, Haaf, Rhodes, Naveh-Bonjamin, Sun, Synder et Rouder (2021), montrent que les différences interindividuelles en termes de proportion de réponses *remember* et *know* en fonction du statut de l'item (ancien ou nouveau) pourraient être interprétées comme des compréhensions différentes des consignes et que les réponses ne refléteraient donc pas le processus sous-jacent. Il serait alors possible d'opposer (pour un même sujet) les blocs (i.e., six essais) majoritairement *remember* aux blocs majoritairement *know*, même si cette comparaison pourrait être impactée par du bruit (i.e., les réponses *know* dans les blocs majoritairement *remember* et inversement).

Malgré les difficultés discutées précédemment, une mesure qualitative de type *Remember-Know* permettrait de sortir de l'interprétation binaire des performances mnésiques de type échec/réussite. L'intérêt de l'évaluation qualitative de la réponse se situe alors également dans la nuance d'interprétation de l'interférence entre la remémoration et une seconde tâche. Dans la même idée qu'une multitude de stratégies posturales est possible pour s'adapter aux contraintes environnementales, il est possible d'envisager, lorsque la reconstruction de scènes est impossible (ou rendue plus difficile par des manipulations expérimentales), que d'autres stratégies soient mises en place pour répondre correctement au rappel de source. Par exemple, Naveh-Bonjamin et Kilb (2012) montrent que les consignes données peuvent orienter les stratégies mises en œuvre pour résoudre la tâche de mémoire. Leurs résultats mettent en évidence des modulations des performances en mémoire avec la procédure de *Remember-Know* conformément à l'idée d'une modification des stratégies mises en œuvre pour résoudre la tâche induite par la consigne. Expliciter, via les consignes les processus de résolution possibles pourraient amener le participant à favoriser, parmi les processus permettant d'aboutir à la bonne réponse, le processus que nous supposons sous-tendre la remémoration épisodique, c'est-à-dire la construction de scènes et la détection de fluence dans ce processus.

Cette hypothèse d'une pluralité des processus constitue une réponse possible à la problématique de modulation des performances mnésique soulevée par Iani (2019). Dans nos travaux, l'hypothèse générale portait bien sur une dépendance du mécanisme permettant l'impression subjective d'épisodicité à un processus de construction de scènes. Nous avons notamment évoqué comment ce mécanisme de fluence à la base de l'expérience qualitative

pouvait apporter une réponse aux questions, propres à la mémoire épisodique, soulevées en philosophie (e.g., la notion de singularité d'un épisode). Les résultats présentés dans cette thèse sont congruents avec cette proposition d'incarnation d'un processus spatial, de construction de scènes, à la base de la remémoration épisodique. L'implication de la remémoration comme processus à la base des réponses à la tâche épisodique n'a été contrainte que par la nature de la tâche proposée (i.e., rappel de source). Un paradigme permettant d'avoir accès à la fois à des aspects qualitatifs et de réussite/échec du rappel reste à construire et serait une prolongation naturelle aux expériences présentées dans cette thèse. Ces travaux constituent une étape intermédiaire dont le but ultime serait de relier un traitement spatial incarné et situé avec un état subjectif spécifique à la remémoration épisodique.

Références

- Addis, D. R., & Schacter, D. L. (2008). Constructive episodic simulation: Temporal distance and detail of past and future events modulate hippocampal engagement. *Hippocampus*, *18*(2), 227-237.
- Addis, D. R., Cheng, T., P. Roberts, R., & Schacter, D. L. (2011). Hippocampal contributions to the episodic simulation of specific and general future events. *Hippocampus*, *21*(10), 1045-1052.
- Addis, D. R., Pan, L., Vu, M. A., Laiser, N., & Schacter, D. L. (2009). Constructive episodic simulation of the future and the past: Distinct subsystems of a core brain network mediate imagining and remembering. *Neuropsychologia*, *47*(11), 2222-2238.
- Addis, D. R., Wong, A. T., & Schacter, D. L. (2007). Remembering the past and imagining the future: common and distinct neural substrates during event construction and elaboration. *Neuropsychologia*, *45*(7), 1363-1377.
- Allison, R. S., Howard, I. P., & Zacher, J. E. (1999). Effect of field size, head motion, and rotational velocity on roll vection and illusory self-tilt in a tumbling room. *Perception*, *28*(3), 299-306.
- Amblard, B., Cremieux, J., Marchand, A. R., & Carblanc, A. (1985). Lateral orientation and stabilization of human stance: static versus dynamic visual cues. *Experimental brain research*, *61*(1), 21-37.
- Andersson, G., Hagman, J., Talianzadeh, R., Svedberg, A., & Larsen, H. C. (2002). *Effect of cognitive load on postural control*. *Brain Research Bulletin*, *58*(1), 135–139. doi:10.1016/s0361-9230(02)00770-0
- Andersson, G., Yardley, L., & Luxon, L. (1998). A dual-task study of interference between mental activity and control of balance. *The American journal of otology*, *19*(5), 632-637.
- Assländer, L., & Peterka, R. J. (2014). Sensory reweighting dynamics in human postural control. *Journal of neurophysiology*, *111*(9), 1852-1864.
- Balasubramaniam, R., & Wing, A. M. (2002). The dynamics of standing balance. *Trends in cognitive sciences*, *6*(12), 531-536.
- Barbour, A. J., & Parker, R. L. (2014). psd: Adaptive, sine multitaper power spectral density estimation for R. *Computers & Geosciences*, *63*, 1-8.
- Barra, J., Bray, A., Sahni, V., Golding, J. F., & Gresty, M. A. (2006). Increasing cognitive load with increasing balance challenge: recipe for catastrophe. *Experimental Brain Research*, *174*(4), 734-745.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annu. Rev. Psychol.*, *59*, 617-645.

- Bartlett, F.C. (1932). Chapter V: The method of repeated reproduction. Dans F.C. Bartlett, *Remembering: a study in experimental and social psychology* (p. 63-94). Cambridge University Press.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1–7. 2014.
- Bayot, M., Dujardin, K., Dissaux, L., Tard, C., Defebvre, L., Bonnet, C. T., ... & Delval, A. (2020). Can dual-task paradigms predict falls better than single task? A systematic literature review. *Neurophysiologie Clinique*.
- Beauchet, O., Annweiler, C., Allali, G., Berrut, G., Herrmann, F. R., & Dubost, V. (2008). Recurrent falls and dual task-related decrease in walking speed: Is there a relationship?. *Journal of the American Geriatrics Society*, 56(7), 1265-1269.
- Becker, W., Raab, S., & Jürgens, R. (2002). Circularvection during voluntary suppression of optokinetic reflex. *Experimental Brain Research*, 144(4), 554-557.
- Berdach, E., & Bakan, P. (1967). Body position and free recall of early memories. *Psychotherapy: Theory, Research & Practice*, 4(3), 101–102. doi:10.1037/h0087945
- Berencsi, A., Ishihara, M., & Imanaka, K. (2005). The functional role of central and peripheral vision in the control of posture. *Human movement science*, 24(5-6), 689-709.
- Bergamin, M., Gobbo, S., Zanutto, T., Sieverdes, J. C., Alberton, C. L., Zaccaria, M., & Ermolao, A. (2014). Influence of age on postural sway during different dual-task conditions. *Frontiers in aging neuroscience*, 6, 271.
- Berger, L., & Bernard-Demanze, L. (2011). Age-related effects of a memorizing spatial task in the adults and elderly postural control. *Gait & Posture*, 33(2), 300-302.
- Bergouignan, L., Nyberg, L., & Ehrsson, H. H. (2014). *Out-of-body-induced hippocampal amnesia. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(12), 4421–4426. doi: 10.1073/pnas.1318801111
- Berntsen, D., & Rubin, D. C. (2006). Emotion and vantage point in autobiographical. *Cognition & Emotion*, 20(8), 1193–1215. doi:10.1080/02699930500371190
- Bonato, F., & Bubka, A. (2006). Chromaticity, spatial complexity, and self-motion perception. *Perception*, 35(1), 53-64.
- Bonnet, C. T. (2016). Advantages and disadvantages of stiffness instructions when studying postural control. *Gait & posture*, 46, 208-210.
- Bonnet, C. T., & Baudry, S. (2016). A functional synergistic model to explain postural control during precise visual tasks. *Gait & Posture*, 50, 120-125.
- Bouisset, S., & Duchêne, J. L. (1994). Is body balance more perturbed by respiration in seating than in standing posture?. *Neuroreport*, 5(8), 957-960.

- Bouisset, S., & Zattara, M. (1981). A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neuroscience letters*, *22*(3), 263-270.
- Brandt, T. (1998). Reciprocal inhibitory visual-vestibular interaction. Visual motion stimulation deactivates the parieto-insular vestibular cortex. *Brain*, *121*(9), 1749–1758. doi: 10.1093/brain/121.9.1749
- Brandt, T., Dichgans, J., & Koenig, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental brain research*, *16*(5), 476-491.
- Bréchet, L., Mange, R., Herbelin, B., Theillaud, Q., Gauthier, B., Serino, A., & Blanke, O. (2019). First-person view of one's body in immersive virtual reality: Influence on episodic memory. *PLOS ONE*, *14*(3). doi: 10.1371/journal.pone.0197763
- Brouillet, D., Vagnot, C., Milhau, A., Brunel, L., Briglia, J., Versace, R., & Rousset, S. (2015). Sensory–motor properties of past actions bias memory in a recognition task. *Psychological research*, *79*(4), 678-686.
- Burgess, N. (2006). Spatial memory: how egocentric and allocentric combine. *Trends in cognitive sciences*, *10*(12), 551-557.
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O'Keefe, J. (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*, *35*(4), 625-641.
- Burgess, N., Recce, M., & O'Keefe, J. (1994). A model of hippocampal function. *Neural Networks*, *7*(6-7), 1065–1081. doi: 10.1016/s0893-6080(05)80159-5
- Burgess, N., Spiers, H. J., & Paleologou, E. (2004). Orientational manoeuvres in the dark: dissociating allocentric and egocentric influences on spatial memory. *Cognition*, *94*(2), 149-166.
- Carpenter, A. C., & Schacter, D. L. (2017). Flexible retrieval: When true inferences produce false memories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *43*(3), 335.
- Cenciarini, M., & Peterka, R. J. (2006). Stimulus-dependent changes in the vestibular contribution to human postural control. *Journal of neurophysiology*, *95*(5), 2733-2750.
- Cerles, M. (2015). *Evaluation et développement d'un modèle de la mémoire épisodique reposant sur un processus de mise à jour égocentrée* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- Cerles, M., & Rousset, S. (2012). Bias in self-motion perceived speed can enhance episodic memory. *Cognitive processing*, *13*(1), 121-124.

- Cerles, M., Guinet, E., & Rousset, S. (2015). Mutual interferences between automatic ongoing spatial-updating with self-motion and source recall. *Consciousness and cognition*, *36*, 103-112.
- Cermak, L. S., Verfaellie, M., Sweeney, M., & Jacoby, L. L. (1992). Fluency versus conscious recollection in the word completion performance of amnesic patients. *Brain and Cognition*, *20*(2), 367–377. doi: 10.1016/0278-2626(92)90027-j
- Cheng, X., Ge, H., Andoni, D., Ding, X., & Fan, Z. (2015). Composite body movements modulate numerical cognition: evidence from the motion-numerical compatibility effect. *Frontiers in psychology*, *6*, 1692.
- Cheung, B. S. K., Howard, I. P., Nedzelski, J. M., & Landolt, J. P. (1989). Circularvection about earth-horizontal axes in bilateral labyrinthine-defective subjects. *Acta otolaryngologica*, *108*(5-6), 336-344.
- Chong, R. K., Mills, B., Dailey, L., Lane, E., Smith, S., & Lee, K. H. (2010). Specific interference between a cognitive task and sensory organization for stance balance control in healthy young adults: visuospatial effects. *Neuropsychologia*, *48*(9), 2709-2718.
- Clark, D. P., & Bruno, D. Time is of the essence: Exploring temporal and spatial organisation in episodic memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1747021821993823.
- Clark, I. A., Hotchin, V., Monk, A., Pizzamiglio, G., Liefgreen, A., & Maguire, E. A. (2019). Identifying the cognitive processes underpinning hippocampal-dependent tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *148*(11), 1861.
- Clark, S., & Riley, M. A. (2007). Multisensory information for postural control: sway-referencing gain shapes center of pressure variability and temporal dynamics. *Experimental brain research*, *176*(2), 299-310.
- Crawley, S., & French, C. (2005). Field and observer viewpoint in remember-know memories of personal childhood events. *Memory*, *13*(7), 673-681.
- D'Amour, S., Harris, L. R., Berti, S., & Keshavarz, B. (2021). The role of cognitive factors and personality traits in the perception of illusory self-motion (vection). *Attention, Perception, & Psychophysics*, *83*(4), 1804-1817.
- D'Argembeau, A., & Van der Linden, M. (2006). Individual differences in the phenomenology of mental time travel: The effect of vivid visual imagery and emotion regulation strategies. *Consciousness and cognition*, *15*(2), 342-350.
- Dalton, M. A., Zeidman, P., McCormick, C., & Maguire, E. A. (2018). Differentiable processing of objects, associations, and scenes within the hippocampus. *Journal of Neuroscience*, *38*(38), 8146-8159.
- Dault, M. C., Frank, J. S., & Allard, F. (2001). Influence of a visuo-spatial, verbal and central executive working memory task on postural control. *Gait & posture*, *14*(2), 110-116.

- Dault, M. C., Geurts, A. C., Mulder, T. W., & Duysens, J. (2001). Postural control and cognitive task performance in healthy participants while balancing on different support-surface configurations. *Gait & posture*, *14*(3), 248-255.
- Dault, M. C., Yardley, L., & Frank, J. S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms?. *Cognitive Brain Research*, *16*(3), 434-440
- De Graaf, B., Wertheim, A. H., & Bles, W. (1991). The Aubert-Fleischl paradox does appear in visually induced self-motion. *Vision Research*, *31*(5), 845-849.
- De Luca, F., McCormick, C., Ciaramelli, E., & Maguire, E. A. (2019). Scene processing following damage to the ventromedial prefrontal cortex. *Neuroreport*, *30*(12), 828.
- De Souza, N. S., Martins, A. C. G., da Silva Canuto, K., Machado, D., Teixeira, S., Orsini, M., ... & Arias-Carrión, O. (2015). Postural control modulation during motor imagery tasks: A systematic review. *International Archives of Medicine*, *8*.
- Della Sala, S., Darling, S., & Logie, R. H. (2010). Items on the left are better remembered. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Deviterne, D., Gauchard, G. C., Jamet, M., Vançon, G., & Perrin, P. P. (2005). Added cognitive load through rotary auditory stimulation can improve the quality of postural control in the elderly. *Brain research bulletin*, *64*(6), 487-492.
- Devitt, A. L., Monk-Fromont, E., Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2016). Factors that influence the generation of autobiographical memory conjunction errors. *Memory*, *24*(2), 204-222.
- Dichgans, J., & Brandt, T. (1978). Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control. *Perception*, *7*55–804. doi: 10.1007/978-3-642-46354-9_25
- Dickerson, B. C., & Eichenbaum, H. (2010). The episodic memory system: neurocircuitry and disorders. *Neuropsychopharmacology*, *35*(1), 86-104.
- Dickinson, C. A., & Intraub, H. (2009). Spatial asymmetries in viewing and remembering scenes: Consequences of an attentional bias?. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *71*(6), 1251-1262.
- Dijkstra, K., Kaschak, M. P., & Zwaan, R. A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, *102*(1), 139-149.
- Diwadkar, V. A., & McNamara, T. P. (1997). Viewpoint dependence in scene recognition. *Psychological science*, *8*(4), 302-307.
- Donker, S. F., Roerdink, M., Greven, A. J., & Beek, P. J. (2007). Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental brain research*, *181*(1), 1-11.

- Dutriaux, L., & Gyselinck, V. (2016). Learning is better with the hands free: The role of posture in the memory of manipulable objects. *PLoS One*, *11*(7), e0159108.
- Edwards, A. S. (1946). Body sway and vision. *Journal of experimental psychology*, *36*(6), 526.
- Ego-Stengel, V., & Wilson, M. A. (2010). Disruption of ripple-associated hippocampal activity during rest impairs spatial learning in the rat. *Hippocampus*, *20*(1), 1-10.
- Ehrenfried, T., Guerraz, M., Thilo, K. V., Yardley, L., & Gresty, M. A. (2003). Posture and mental task performance when viewing a moving visual field. *Cognitive Brain Research*, *17*(1), 140-153.
- Eichenbaum, H., Dudchenko, P., Wood, E., Shapiro, M., & Tanila, H. (1999). The hippocampus, memory, and place cells: is it spatial memory or a memory space?. *Neuron*, *23*(2), 209-226.
- Ekstrom, A. D., & Ranganath, C. (2018). Space, time, and episodic memory: The hippocampus is all over the cognitive map. *Hippocampus*, *28*(9), 680-687. doi: 10.1002/hipo.22750
- Epstein, R. A., Patai, E. Z., Julian, J. B., & Spiers, H. J. (2017). The cognitive map in humans: spatial navigation and beyond. *Nature neuroscience*, *20*(11), 1504-1513.
- Era, P., & Heikkinen, E. (1985). Postural sway during standing and unexpected disturbance of balance in random samples of men of different ages. *Journal of gerontology*, *40*(3), 287-295.
- Ezzyat, Y., & Davachi, L. (2011). What constitutes an episode in episodic memory?. *Psychological science*, *22*(2), 243-252.
- Farrell, M. J., & Robertson, I. H. (1998). Mental rotation and automatic updating of body-centered spatial relationships. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *24*(1), 227.
- Fraizer, E. V., & Mitra, S. (2007). Postural costs of performing cognitive tasks in non-coincident reference frames. *Experimental brain research*, *185*(3), 429-441.
- Fraizer, E. V., & Mitra, S. (2008). Methodological and interpretive issues in posture-cognition dual-tasking in upright stance. *Gait & posture*, *27*(2), 271-279.
- Francuz, P. (2010). The influence of body position and spatial orientation of an object on mental rotation task's performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *5*, 896-900.
- Frank, J. S., & Earl, M. (1990). Coordination of posture and movement. *Physical therapy*, *70*(12), 855-863.
- Fushiki, H., Kobayashi, K., Asai, M., & Watanabe, Y. (2005). Influence of visually induced self-motion on postural stability. *Acta oto-laryngologica*, *125*(1), 60-64.

- Gaesser, B., Sacchetti, D. C., Addis, D. R., & Schacter, D. L. (2011). Characterizing age-related changes in remembering the past and imagining the future. *Psychology and aging, 26*(1), 80.
- Gandemer, L., Parseihian, G., Kronland-Martinet, R., & Bourdin, C. (2017). Spatial cues provided by sound improve postural stabilization: evidence of a spatial auditory map?. *Frontiers in neuroscience, 11*, 357.
- Gardiner, J. M. (1988). Functional aspects of recollective experience. *Memory & cognition, 16*(4), 309-313.
- Geraci, L., & McCabe, D. P. (2006). Examining the basis for illusory recollection: The role of remember/know instructions. *Psychonomic Bulletin & Review, 13*(3), 466-473.
- Geraci, L., McCabe, D. P., & Guillory, J. J. (2009). On interpreting the relationship between remember–know judgments and confidence: The role of instructions. *Consciousness and cognition, 18*(3), 701-709. doi: 10.1016/j.concog.2009.04.010
- Gérardin-Laverge, L. (2017). Mémoire constructive, imagination et voyage mental dans le temps. *Cahiers philosophiques, 149*(2), 23-40. <https://doi.org/10.3917/caph1.149.0023>
- Ghai, S., Ghai, I., & Effenberg, A. O. (2017). Effects of dual tasks and dual-task training on postural stability: a systematic review and meta-analysis. *Clinical interventions in aging, 12*, 557.
- Ghamkhar, L., & Kahlaee, A. H. (2019). The effect of trunk muscle fatigue on postural control of upright stance: A systematic review. *Gait & posture, 72*, 167-174.
- Glenberg, A. M. (1997). What memory is for. *Behavioral and brain sciences, 20*(1), 1-19.
- Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of psychology, 66*(3), 325-331.
- Golomer, E., & Dupui, P. (2000). Spectral analysis of adult dancers' sways: sex and interaction vision-proprioception. *International Journal of Neuroscience, 105*(1-4), 15-26.
- Golomer, E., Crémieux, J., Dupui, P., Isableu, B., & Ohlmann, T. (1999). Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. *Neuroscience letters, 267*(3), 189-192.
- Gomez, A., Rousset, S., & Baciú, M. (2009). Egocentric-updating during navigation facilitates episodic memory retrieval. *Acta psychologica, 132*(3), 221-227.
- Gomez, A., Rousset, S., & Charnallet, A. (2012). Spatial deficits in an amnesic patient with hippocampal damage: questioning the multiple trace theory. *Hippocampus, 22*(6), 1313-1324.
- Gomez, A., Rousset, S., Bonniot, C., Charnallet, A., & Moreaud, O. (2015). Deficits in egocentric-updating and spatial context memory in a case of developmental amnesia. *Neurocase, 21*(2), 226-243.

- Grangeon, M., Guillot, A., & Collet, C. (2011). Postural control during visual and kinesthetic motor imagery. *Applied psychophysiology and biofeedback*, *36*(1), 47-56.
- Gresty, M. A., Golding, J. F., Le, H., & Nightingale, K. (2008). Cognitive impairment by spatial disorientation. *Aviation, space, and environmental medicine*, *79*(2), 105-111.
- Gresty, M. A., Waters, S., Bray, A., Bunday, K., & Golding, J. F. (2003). Impairment of spatial cognitive function with preservation of verbal performance during spatial disorientation. *Current Biology*, *13*(21), R829-R830.
- Gresty, M., & Golding, J. (2009). Impact of vertigo and spatial disorientation on concurrent cognitive tasks. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1164*(1), 263-267.
- Guerraz, M., & Bronstein, A. M. (2008). Mechanisms underlying visually induced body sway. *Neuroscience letters*, *443*(1), 12-16.
- Harquel, S., Guerraz, M., Barraud, P. A., & Cian, C. (2020). Modulation of alpha waves in sensorimotor cortical networks during self-motion perception evoked by different visual-vestibular conflicts. *Journal of neurophysiology*, *123*(1), 346-355.
- Hartmann, M., Grabherr, L., & Mast, F. W. (2012). Moving along the mental number line: Interactions between whole-body motion and numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*(6), 1416.
- Hassabis, D., & Maguire, E. A. (2007). *Deconstructing episodic memory with construction*. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(7), 299–306. doi:10.1016/j.tics.2007.05.001
- Hassabis, D., & Maguire, E. A. (2009). The construction system of the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1521), 1263-1271.
- Hassabis, D., Kumaran, D., Vann, S. D., & Maguire, E. A. (2007). Patients with hippocampal amnesia cannot imagine new experiences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(5), 1726-1731.
- Held, R., Dichgans, J., & Bauer, J. (1975). Characteristics of moving visual scenes influencing spatial orientation. *Vision Research*, *15*(3), 357-IN1.
- Hirshhorn, M., Grady, C., Rosenbaum, R. S., Winocur, G., & Moscovitch, M. (2012). Brain regions involved in the retrieval of spatial and episodic details associated with a familiar environment: An fMRI study. *Neuropsychologia*, *50*(13), 3094–3106. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.20
- Hirshman, E., & Master, S. (1997). Modeling the conscious correlates of recognition memory: Reflections on the remember-know paradigm. *Memory & Cognition*, *25*(3), 345-351.
- Hodges, P. W., & Richardson, C. A. (1997). Contraction of the abdominal muscles associated with movement of the lower limb. *Physical therapy*, *77*(2), 132-142.

- Hodgetts, C. J., Shine, J. P., Lawrence, A. D., Downing, P. E., & Graham, K. S. (2016). Evidencing a place for the hippocampus within the core scene processing network. *Human brain mapping, 37*(11), 3779-3794.
- Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls?. *Age and ageing, 35*(suppl_2), ii7-ii11.
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of neurophysiology, 55*(6), 1369-1381.
- Horiuchi, K., Imanaka, K., & Ishihara, M. (2021). Postural sway in the moving room scenario: New evidence for functional dissociation between self-motion perception and postural control. *PloS one, 16*(9), e0257212.
- Horner, A. J., Bisby, J. A., Wang, A., Bogus, K., & Burgess, N. (2016). The role of spatial boundaries in shaping long-term event representations. *Cognition, 154*, 151-164.
- Hubbard, T. L., Hutchison, J. L., & Courtney, J. R. (2010). Boundary extension: Findings and theories. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 63*(8), 1467-1494.
- Huffman, D. J., & Ekstrom, A. D. (2021). An Important Step toward Understanding the Role of Body-based Cues on Human Spatial Memory for Large-Scale Environments. *Journal of Cognitive Neuroscience, 33*(2), 167-179. doi: 10.1162/jocn_a_01653
- Hufschmidt, A., Dichgans, J., Mauritz, K. H., & Hufschmidt, M. (1980). Some methods and parameters of body sway quantification and their neurological applications. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 228*(2), 135-150.
- Huxhold, O., Li, S. C., Schmiedek, F., & Lindenberger, U. (2006). Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention. *Brain research bulletin, 69*(3), 294-305.
- Iani, F. (2019). Embodied memories: Reviewing the role of the body in memory processes. *Psychonomic bulletin & review, 26*(6), 1747-1766.
- Indovina, I., Maffei, V., Bosco, G., Zago, M., Macaluso, E., & Lacquaniti, F. (2005). Representation of visual gravitational motion in the human vestibular cortex. *Science, 308*(5720), 416-419.
- Intraub, H., & Dickinson, C. A. (2008). False memory 1/20th of a second later: What the early onset of boundary extension reveals about perception. *Psychological Science, 19*(10), 1007-1014.
- Intraub, H., Bender, R. S., & Mangels, J. A. (1992). Looking at pictures but remembering scenes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 18*(1), 180.

- Irish, M., & Piguet, O. (2013). The pivotal role of semantic memory in remembering the past and imagining the future. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 7, 27.
- Isableu, B., Ohlmann, T., Crémieux, J., & Amblard, B. (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Experimental brain research*, 114(3), 584-589.
- Isableu, B., Ohlmann, T., Crémieux, J., & Amblard, B. (2003). Differential approach to strategies of segmental stabilisation in postural control. *Experimental Brain Research*, 150(2), 208-221.
- Jacoby, L. L., Kelley, C. M., & Dywan, J. (1989). Chapter 19: Memory attributions. Dans *Varieties of memory and consciousness: Essays in honour of Endel Tulving*, 391-422.
- Jamet, M., Deviterne, D., Gauchard, G. C., Vançon, G., & Perrin, P. P. (2007). Age-related part taken by attentional cognitive processes in standing postural control in a dual-task context. *Gait & Posture*, 25(2), 179–184. doi:10.1016/j.gaitpost.2006.03.00
- Jeong, B. Y. (1991). Respiration effect on standing balance. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 72(9), 642-645.
- Jonker, T. R., Dimsdale-Zucker, H., Ritchey, M., Clarke, A., & Ranganath, C. (2018). Neural reactivation in parietal cortex enhances memory for episodically linked information. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(43), 11084-11089.
- Kanekar, N., Lee, Y. J., & Aruin, A. S. (2014). Frequency analysis approach to study balance control in individuals with multiple sclerosis. *Journal of neuroscience methods*, 222, 91-96.
- Kappes, C., Streubel, B., Droste, K. L., & Folta-Schoofs, K. (2017). Linking the positivity effect in attention with affective outcomes: Age group differences and the role of arousal. *Frontiers in psychology*, 8, 1877.
- Kelly, V. E., Eusterbrock, A. J., & Shumway-Cook, A. (2013). Factors influencing dynamic prioritization during dual-task walking in healthy young adults. *Gait & posture*, 37(1), 131-134.
- Kerr, B., Condon, S. M., & McDonald, L. A. (1985). Cognitive spatial processing and the regulation of posture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 617.
- Keshavarz, B., Hettinger, L. J., Vena, D., & Campos, J. L. (2014). Combined effects of auditory and visual cues on the perception of vection. *Experimental brain research*, 232(3), 827-836.
- Keshavarz, B., Philipp-Muller, A. E., Hemmerich, W., Riecke, B. E., & Campos, J. L. (2019). The effect of visual motion stimulus characteristics on vection and visually induced motion sickness. *Displays*, 58, 71-81.

- Kim, S., Borst, G., Thompson, W. L., Hopkins, R. O., Kosslyn, S. M., & Squire, L. R. (2013). Sparing of spatial mental imagery in patients with hippocampal lesions. *Learning & Memory, 20*(11), 657-663.
- Kim, S., Dede, A. J., Hopkins, R. O., & Squire, L. R. (2015). Memory, scene construction, and the human hippocampus. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 112*(15), 4767-4772.
- King, J. A., Burgess, N., Hartley, T., Vargha-Khadem, F., & O'Keefe, J. (2002). Human hippocampus and viewpoint dependence in spatial memory. *Hippocampus, 12*(6), 811-820.
- Kitazaki, M., & Sato, T. (2003). Attentional modulation of self-motion perception. *Perception, 32*(4), 475-484.
- Klein, S. B., Loftus, J., & Kihlstrom, J. F. (2002). Memory and temporal experience: The effects of episodic memory loss on an amnesic patient's ability to remember the past and imagine the future. *Social Cognition, 20*(5), 353-379.
- Kuno, S., Kawakita, T., Kawakami, O., Miyake, Y., & Watanabe, S. (1999). Postural adjustment response to depth direction moving patterns produced by virtual reality graphics. *The Japanese journal of physiology, 49*(5), 417-424.
- Laboissière, R., Barraud, P. A., & Cian, C. (2017). Real and visually-induced body inclination differently affect the perception of object stability. *PloS one, 12*(10), e0186431.
- Laboissiere, R., Letievant, J. C., Ionescu, E., Barraud, P. A., Mazzuca, M., & Cian, C. (2015). Relationship between spectral characteristics of spontaneous postural sway and motion sickness susceptibility. *PLoS One, 10*(12), e0144466.
- Lajoie, Y., Richer, N., Jehu, D. A., & Tran, Y. (2016). Continuous cognitive tasks improve postural control compared to discrete cognitive tasks. *Journal of Motor Behavior, 48*(3), 264-269.
- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C., & Fleury, M. (1993). *Attentional demands for static and dynamic equilibrium. Experimental Brain Research, 97*(1). doi:10.1007/bf00228824
- Laurens, J., Awai, L., Bockisch, C. J., Hegemann, S., Van Hedel, H. J. A., Dietz, V., & Straumann, D. (2010). Visual contribution to postural stability: Interaction between target fixation or tracking and static or dynamic large-field stimulus. *Gait & posture, 31*(1), 37-41.
- Le Clair, K., & Riach, C. (1996). Postural stability measures: what to measure and for how long. *Clinical Biomechanics, 11*(3), 176-178. doi:10.1016/0268-0033(95)00027-5
- Lenth, R. (2019). Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

- Lepecq, J. C., Giannopulu, I., & Baudonniere, P. M. (1995). Cognitive effects on visually induced body motion in children. *Perception, 24*(4), 435-449.
- Levine, B., Svoboda, E., Hay, J. F., Winocur, G., & Moscovitch, M. (2002). Aging and autobiographical memory: dissociating episodic from semantic retrieval. *Psychology and aging, 17*(4), 677.
- Li, K. Z., Lindenberger, U., Freund, A. M., & Baltes, P. B. (2001). Walking while memorizing: Age-related differences in compensatory behavior. *Psychological science, 12*(3), 230-237.
- Lin, Y. T. (2018). Visual perspectives in episodic memory and the sense of self. *Frontiers in psychology, 9*, 2196.
- Lipsitz, L. A. (2002). Dynamics of stability: the physiologic basis of functional health and frailty. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences, 57*(3), B115-B125.
- Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology, 18*(2), R60-R62. Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology, 18*(2), R60-R62.
- Longo, M. R., & Lourenco, S. F. (2007). Spatial attention and the mental number line: Evidence for characteristic biases and compression. *Neuropsychologia, 45*(7), 1400-1407.
- Lubetzky, A. V., Gospodarek, M., Arie, L., Kelly, J., Roginska, A., & Cosetti, M. (2020). Auditory input and postural control in adults: a narrative review. *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery, 146*(5), 480-487.
- Lundström, J. N., Boyle, J. A., & Jones-Gotman, M. (2006). Sit up and smell the roses better: olfactory sensitivity to phenyl ethyl alcohol is dependent on body position. *Chemical senses, 31*(3), 249-252.
- Madan, C. R., & Singhal, A. (2012). Using actions to enhance memory: effects of enactment, gestures, and exercise on human memory. *Frontiers in Psychology, 3*, 507.
- Madelrieux, S. (2012). Expérierer. *Critique, 787*, 1012-1013. doi : 10.3917/criti.787.1012
- Madore, K. P., & Schacter, D. L. (2016). Remembering the past and imagining the future: Selective effects of an episodic specificity induction on detail generation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 69*(2), 285-298.
- Madore, K. P., Gaesser, B., & Schacter, D. L. (2014). Constructive episodic simulation: dissociable effects of a specificity induction on remembering, imagining, and describing in young and older adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 40*(3), 609.

- Maguire, E. A. (2001). Neuroimaging, memory and the human hippocampus. *Revue neurologique*, 157(8-9 Pt 1), 791-794.
- Maguire, E. A., & Hassabis, D. (2011). Role of the hippocampus in imagination and future thinking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(11), E39-E39.
- Maguire, E. A., & Mullally, S. L. (2013). The hippocampus: a manifesto for change. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1180.
- Maguire, E. A., Woollett, K., & Spiers, H. J. (2006). London taxi drivers and bus drivers: a structural MRI and neuropsychological analysis. *Hippocampus*, 16(12), 1091-1101.
- Mahboobin, A., Loughlin, P. J., Redfern, M. S., & Sparto, P. J. (2005). Sensory re-weighting in human postural control during moving-scene perturbations. *Experimental Brain Research*, 167(2), 260-267.
- Mahboobin, A., Loughlin, P., Atkeson, C., & Redfern, M. (2009). A mechanism for sensory re-weighting in postural control. *Medical & biological engineering & computing*, 47(9), 921-929.
- Maki, B. E., Holliday, P. J., & Fernie, G. R. (1990). Aging and postural control: a comparison of spontaneous-and induced-sway balance tests. *Journal of the American Geriatrics Society*, 38(1), 1-9.
- Marchette, S. A., Yerramsetti, A., Burns, T. J., & Shelton, A. L. (2011). Spatial memory in the real world: long-term representations of everyday environments. *Memory & cognition*, 39(8), 1401-1408.
- Marcotti, P., & St. Jacques, P. L. (2018). Shifting visual perspective during memory retrieval reduces the accuracy of subsequent memories. *Memory*, 26(3), 330-341.
- Marendaz, C., Stivalet, P., Barraclough, L., & Walkowiak, P. (1993). Effect of gravitational cues on visual search for orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(6), 1266–1277. doi:10.1037/0096-1523.19.6.1266
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current opinion in neurobiology*, 4(6), 877-887.
- Maylor, E. A., & Wing, A. M. (1996). Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 51(3), P143-P154.
- Maylor, E. A., Allison, S., & Wing, A. M. (2001). Effects of spatial and nonspatial cognitive activity on postural stability. *British Journal of Psychology*, 92(2), 319–338. doi:10.1348/000712601162211
- McCormick, C., & Maguire, E. A. (2021). The distinct and overlapping brain networks supporting semantic and spatial constructive scene processing. *Neuropsychologia*, 107912.

- McCormick, C., Dalton, M. A., Zeidman, P., & Maguire, E. A. (2021). Characterising the hippocampal response to perception, construction and complexity. *cortex*, *137*, 1-17.
- McGeehan, M. A., Woollacott, M. H., & Dalton, B. H. (2017). Vestibular control of standing balance is enhanced with increased cognitive load. *Experimental brain research*, *235*(4), 1031-1040.
- McGeorge, P., Beschin, N., Colnaghi, A., Rusconi, M. L., & Della Sala, S. (2007). A lateralized bias in mental imagery: Evidence for representational pseudoneglect. *Neuroscience letters*, *421*(3), 259-263.
- McIsaac, H. K., & Eich, E. (2002). Vantage point in episodic memory. *Psychonomic bulletin & review*, *9*(1), 146-150.
- McNevin, N. H., & Wulf, G. (2002). Attentional focus on supra-postural tasks affects postural control. *Human movement science*, *21*(2), 187-202.
- Michaelian, K., Perrin, D., & Sant'Anna, A. (2020). Continuities and Discontinuities Between Imagination and Memory: The View from Philosophy. *The Cambridge handbook of the imagination*, 293.
- Michalak, J., Rohde, K., & Troje, N. F. (2015). How we walk affects what we remember: Gait modifications through biofeedback change negative affective memory bias. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, *46*, 121-125.
- Mickes, L., Seale-Carlisle, T. M., & Wixted, J. T. (2013). Rethinking familiarity: Remember/Know judgments in free recall. *Journal of memory and language*, *68*(4), 333-349.
- Miles, L. K., Karpinska, K., Lumsden, J., & Macrae, C. N. (2010). The meandering mind: Vection and mental time travel. *PloS one*, *5*(5).
- Miles, L., Nind, L., & Macrae, C. (2010). Moving through time. *Psychological Science*, *21*(2), 222.
- Mitra, S. (2003). Postural costs of suprapostural task load. *Human Movement Science*, *22*(3), 253–270. doi:10.1016/s0167-9457(03)00052-6
- Mitra, S. (2004). Adaptive Utilization of Optical Variables During Postural and Suprapostural Dual-Task Performance: Comment on Stoffregen, Smart, Bardy, and Pagulayan (1999). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*(1), 28–38. doi:10.1037/0096-1523.30.1.28
- Mitra, S., & Fraizer, E. V. (2004). Effects of explicit sway-minimization on postural–suprapostural dual-task performance. *Human movement science*, *23*(1), 1-20.
- Mori, M., & Seno, T. (2018). Inhibition of vection by grasping an object. *Experimental brain research*, *236*(12), 3215-3221.

- Moscovitch, M., & Nadel, L. (1998). Consolidation and the hippocampal complex revisited: in defense of the multiple-trace model. *Current opinion in neurobiology*, 8(2), 297-300.
- Moscovitch, M., Rosenbaum, R. S., Gilboa, A., Addis, D. R., Westmacott, R., Grady, C., ... & Nadel, L. (2005). Functional neuroanatomy of remote episodic, semantic and spatial memory: a unified account based on multiple trace theory. *Journal of anatomy*, 207(1), 35-66.
- Muehlhan, M., Marxen, M., Landsiedel, J., Malberg, H., & Zaunseder, S. (2014). The effect of body posture on cognitive performance: a question of sleep quality. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 171.
- Mullally, S. L., & Maguire, E. A. (2014). Memory, imagination, and predicting the future: a common brain mechanism?. *The Neuroscientist*, 20(3), 220-234.
- Mullally, S. L., Intraub, H., & Maguire, E. A. (2012). Attenuated boundary extension produces a paradoxical memory advantage in amnesic patients. *Current Biology*, 22(4), 261-268.
- Müller, M. L., Redfern, M. S., & Jennings, J. R. (2007). Postural prioritization defines the interaction between a reaction time task and postural perturbations. *Experimental brain research*, 183(4), 447-456.
- Murata, A. (2004). Effects of duration of immersion in a virtual reality environment on postural stability. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(4), 463-477.
- Nadel, L., & Moscovitch, M. (1997). Memory consolidation, retrograde amnesia and the hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology*, 7(2), 217-227. doi: 10.1016/s0959-4388(97)80010-4
- Nadel, L., Winocur, G., Ryan, L., & Moscovitch, M. (2007). Systems consolidation and hippocampus: two views. *Debates in Neuroscience*, 1(2-4), 55-66.
- Nagy, E., Toth, K., Janositz, G., Kovacs, G., Feher-Kiss, A., Angyan, L., & Horvath, G. (2004). Postural control in athletes participating in an ironman triathlon. *European journal of applied physiology*, 92(4), 407-413.
- Naveh-Benjamin, M., & Kilb, A. (2012). How the measurement of memory processes can affect memory performance: The case of remember/know judgments. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(1), 194-203. doi:10.1037/a0025256
- Nuthmann, A., & Matthias, E. (2014). Time course of pseudoneglect in scene viewing. *Cortex*, 52, 113-119.
- Nyberg, L., Habib, R., McIntosh, A. R., & Tulving, E. (2000). Reactivation of encoding-related brain activity during memory retrieval. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(20), 11120-11124.

- Nyberg, L., McIntosh, A. R., Cabeza, R., Habib, R., Houle, S., & Tulving, E. (1996). General and specific brain regions involved in encoding and retrieval of events: what, where, and when. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*(20), 11280-11285.
- Oblak, B., Gregorič, M., & Gyergyek, L. (1985). Effects of Voluntary Eye Saccades on Body Sway1. In *Vestibular and visual control on posture and locomotor equilibrium* (pp. 122-126). Karger Publishers.
- Ogawa, M., & Seno, T. (2014). Vection is modulated by the semantic meaning of stimuli and experimental instructions. *Perception*, *43*(7), 605-615.
- Oie, K. S., Kiemel, T., & Jeka, J. J. (2002). Multisensory fusion: simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture. *Cognitive Brain Research*, *14*(1), 164-176.
- O'Keefe, J. (1976). Place units in the hippocampus of the freely moving rat. *Experimental neurology*, *51*(1), 78-109.
- O'Keefe, J. (1990). A computational theory of the hippocampal cognitive map. *Progress in brain research*, *83*, 301-312.
- O'Keefe, J., Burgess, N., Donnett, J. G., Jeffery, K. J., & Maguire, E. A. (1998). Place cells, navigational accuracy, and the human hippocampus. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *353*(1373), 1333-1340.
- Olkkonen, M., Hansen, T., & Gegenfurtner, K. R. (2008). Color appearance of familiar objects: Effects of object shape, texture, and illumination changes. *Journal of vision*, *8*(5), 13-13.
- Oman, C. M., Shebilske, W. L., Richards, J. T., Tubré, T. C., Beall, A. C., & Natapoff, A. (2002). Three dimensional spatial memory and learning in real and virtual environments. *Spatial Cognition and computation*, *2*(4), 355-372.
- Paillard, T. (2012). Effects of general and local fatigue on postural control: a review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(1), 162-176.
- Palmisano, S., & Chan, A. Y. (2004). Jitter and size effects on vection are immune to experimental instructions and demands. *Perception*, *33*(8), 987-1000.
- Palmisano, S., & Kim, J. (2009). Effects of gaze on vection from jittering, oscillating, and purely radial optic flow. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *71*(8), 1842-1853.
- Palmisano, S., Allison, R. S., Schira, M. M., & Barry, R. J. (2015). Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Frontiers in psychology*, *6*, 193.
- Palmisano, S., Apthorp, D., Seno, T., & Stapley, P. (2013). Spontaneous postural instability predicts susceptibility to smooth vection. *Journal of Vision*, *13*(9), 703-703.
- Palmisano, S., Burke, D., & Allison, R. S. (2003). Coherent perspective jitter induces visual illusions of self-motion. *Perception*, *32*(1), 97-110.

- Palmisano, S., Gillam, B. J., & Blackburn, S. G. (2000). Global-perspective jitter improves vection in central vision. *Perception*, 29(1), 57-67.
- Palombo, D. J., Hayes, S. M., Peterson, K. M., Keane, M. M., & Verfaellie, M. (2018). Medial temporal lobe contributions to episodic future thinking: scene construction or future projection?. *Cerebral Cortex*, 28(2), 447-458.
- Perrin, D. (2019). Le contenu du souvenir épisodique : une singularité non fondée sur l'accoutance. *Les Études philosophiques*, 130, 479-496. <https://doi-org.sidnomade-2.grenet.fr/10.3917/leph.193.0479>
- Perrin, D., & Rousset, S. (2014). The episodicity of memory. *Review of Philosophy and Psychology*, 5(3), 291-312.
- Peru, A., & Sebastien Morgant, J. (2006). When supine is better than upright: Evidence from postural effects in extinction patients. *Brain Research*, 1110(1), 175–181. doi:10.1016/j.brainres.2006.06.071
- Peterka, R. J. (2018). Chapter 2 : Sensory integration for human balance control. Dans B. L. Day et S. R. Lord, *Handbook of clinical neurology* (p. 27-42).
- Peterka, R. J., & Loughlin, P. J. (2004). Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control. *Journal of neurophysiology*, 91(1), 410-423.
- Petersen, H., Magnusson, M., Fransson, P. A., & Johansson, R. (1994). Vestibular disturbance at frequencies above 1 Hz affects human postural control. *Acta oto-laryngologica*, 114(3), 225-230.
- Plummer, P., Apple, S., Dowd, C., & Keith, E. (2015). Texting and walking: Effect of environmental setting and task prioritization on dual-task interference in healthy young adults. *Gait & posture*, 41(1), 46-51.
- Polskaia, N., Richer, N., Dionne, E., & Lajoie, Y. (2015). Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention. *Gait & posture*, 41(2), 454-458.
- Potvin-Desrochers, A., Richer, N., & Lajoie, Y. (2017). Cognitive tasks promote automatization of postural control in young and older adults. *Gait & posture*, 57, 40-45.
- Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 43(9), 956-966.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., McNamara, J. O., Williams, S. M. (2005). Chapitre 13 : Le système vestibulaire. Dans *Neurosciences*, p. 315-335. 3ème édition, De Boeck.

- Pyykkö, I., Aalto, H., Starck, J., & Ishizaki, H. (1993). Postural stabilization on a moving platform oscillating at high frequencies. *Aviation, space, and environmental medicine*, *64*(4), 300-305.
- Rajaram, S. (1993). Remembering and knowing: Two means of access to the personal past. *Memory & cognition*, *21*(1), 89-102.
- Ramdani, S., Seigle, B., Lagarde, J., Bouchara, F., & Bernard, P. L. (2009). On the use of sample entropy to analyze human postural sway data. *Medical engineering & physics*, *31*(8), 1023-1031.
- Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Shockley, K., & Chiu, C. Y. P. (2007). Postural responses to specific types of working memory tasks. *Gait & posture*, *25*(3), 368-373.
- Rey, A. E., Riou, B., & Versace, R. (2014). Demonstration of an Ebbinghaus illusion at a memory level. *Experimental Psychology*.
- Rey, A. E., Riou, B., Muller, D., Dabic, S., & Versace, R. (2015). "The mask who wasn't there": visual masking effect with the perceptual absence of the mask. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *41*(2), 567.
- Rey, F., Lê, T.-T., Bertin, R., & Kapoula, Z. (2008). Saccades horizontal or vertical at near or at far do not deteriorate postural control. *Auris Nasus Larynx*, *35*(2), 185–191. doi:10.1016/j.anl.2007.07.001
- Reynolds, J. R., Zacks, J. M., & Braver, T. S. (2007). A computational model of event segmentation from perceptual prediction. *Cognitive science*, *31*(4), 613-643.
- Rhea, C. K., Diekfuss, J. A., Fairbrother, J. T., & Raisbeck, L. D. (2019). Postural control entropy is increased when adopting an external focus of attention. *Motor Control*, *23*(2), 230-242.
- Richer, N., Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2017). Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention in older adults. *Experimental aging research*, *43*(1), 21-33.
- Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, *278*(6), H2039-H2049.
- Riecke, B. E. (2009). Cognitive and higher-level contributions to illusory self-motion perception ("vection"): Does the possibility of actual motion affect vection? (Spatio-temporal integration of multimodal sensations, Symposium 2 at the 27th Annual Meeting). *The Japanese journal of psychonomic science*, *28*(1), 135-139.
- Riecke, B. E., Feuereissen, D., & Rieser, J. J. (2008, August). Auditory self-motion illusions ("circular vection") can be facilitated by vibrations and the potential for actual motion. In *Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (pp. 147-154).

- Riecke, B. E., Feuereissen, D., Rieser, J. J., & McNamara, T. P. (2011, May). Spatialized sound enhances biomechanically-induced self-motion illusion (vection). In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2799-2802).
- Riecke, B. E., Feuereissen, D., Rieser, J. J., & McNamara, T. P. (2015). More than a cool illusion? Functional significance of self-motion illusion (circular vection) for perspective switches. *Frontiers in Psychology, 6*, 1174.
- Riecke, B. E., Schulte-Pelkum, J., Avraamides, M. N., Von Der Heyde, M., & Bühlhoff, H. H. (2005, August). Scene consistency and spatial presence increase the sensation of self-motion in virtual reality. In *Proceedings of the 2nd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (pp. 111-118).
- Riecke, B. E., Schulte-Pelkum, J., Caniard, F., & Bulthoff, H. H. (2005, March). Towards lean and elegant self-motion simulation in virtual reality. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.* (pp. 131-138). IEEE.
- Riley, M. A., Baker, A. A., & Schmit, J. M. (2003). *Inverse relation between postural variability and difficulty of a concurrent short-term memory task. Brain Research Bulletin, 62(3), 191–195.* doi:10.1016/j.brainresbull.2003.0
- Riley, M. A., Mitra, S., Saunders, N., Kiefer, A. W., & Wallot, S. (2012). The interplay between posture control and memory for spatial locations. *Experimental brain research, 217(1), 43-52.*
- Risi, D., & Palmisano, S. (2019). Effects of postural stability, active control, exposure duration and repeated exposures on HMD induced cybersickness. *Displays, 60, 9-17.*
- Roberts, R. P., Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2018). Scene construction and relational processing: Separable constructs?. *Cerebral Cortex, 28(5), 1729-1732.*
- Roerdink, M., De Haart, M., Daffertshofer, A., Donker, S. F., Geurts, A. C. H., & Beek, P. J. (2006). Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Experimental brain research, 174(2), 256.*
- Salsabili, H., Bahrpeyma, F., Esteki, A., Karimzadeh, M., & Ghomashchi, H. (2013). Spectral characteristics of postural sway in diabetic neuropathy patients participating in balance training. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders, 12(1), 1-8.*
- Samuel, A. J., Solomon, J., & Mohan, D. (2015). A critical review on the normal postural control. *Physiotherapy and Occupational Therapy Journal, 8(2), 71.*
- Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2007a). The cognitive neuroscience of constructive memory: remembering the past and imagining the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 362(1481), 773-786.*
- Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2007b). The ghosts of past and future. *Nature, 445(7123), 27-27.*

- Schacter, D. L., & Addis, D. R. (2020). Memory and imagination: Perspectives on constructive episodic simulation. *The Cambridge Handbook of Imagination*, A. Abraham, Ed. (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2020), 111-131.
- Schacter, D. L., Addis, D. R., Hassabis, D., Martin, V. C., Spreng, R. N., & Szpunar, K. K. (2012). The Future of Memory: Remembering, Imagining, and the Brain. *Neuron*, 76(4), 677–694. doi: 10.1016/j.neuron.2012.11.001
- Schacter, D. L., Benoit, R. G., & Szpunar, K. K. (2017). Episodic future thinking: Mechanisms and functions. *Current opinion in behavioral sciences*, 17, 41-50.
- Schacter, D. L., Norman, K. A., & Koutstaal, W. (1998). The cognitive neuroscience of constructive memory. *Annual Review of Psychology*, 49(1), 289–318. doi: 10.1146/annurev.psych.49.1.289
- Schneider, E., Jahn, K., Dieterich, M., Brandt, T., & Strupp, M. (2008). Gait deviations induced by visual stimulation in roll. *Experimental brain research*, 185(1), 21-26.
- Schulman, D., & Shontz, F. C. (1971). Body posture and thinking. *Perceptual and motor skills*, 32(1), 27-33.
- Scoville, W. B., & Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 20(1), 11.
- Seamon, J. G., Schlegel, S. E., Hiester, P. M., Landau, S. M., & Blumenthal, B. F. (2002). Misremembering pictured objects: people of all ages demonstrate the boundary extension illusion. *The American journal of psychology*.
- Segal, S. J., & Fusella, V. (1970). Influence of imaged pictures and sounds on detection of visual and auditory signals. *Journal of experimental psychology*, 83(3p1), 458.
- Sen, A., Yilmaz, K., & Tore, H. F. (2003). *Effects of spatial disorientation on cognitive functions*. TURKISH AEROMEDICAL CENTER ANKARA.
- Seno, T., Ito, H., & Sunaga, S. (2011). Attentional load inhibits vection. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(5), 1467-1476.
- Seno, T., Murata, K., Fujii, Y., Kanaya, H., Ogawa, M., Tokunaga, K., & Palmisano, S. (2018). Vection is enhanced by increased exposure to optic flow. *i-Perception*, 9(3), 2041669518774069.
- Seno, T., Taya, S., Ito, H., & Sunaga, S. (2011). The mental number line in depth revealed by vection. *Perception*, 40(10), 1241-1244.
- Sharma, S., Rakoczy, S., & Brown-Borg, H. (2010). Assessment of spatial memory in mice. *Life sciences*, 87(17-18), 521-536. doi: 10.1016/j.lfs.2010.09.004

- Sheldon, S., & Chu, S. (2017). What versus where: Investigating how autobiographical memory retrieval differs when accessed with thematic versus spatial information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(9), 1909-1921.
- Shelton, A. L., & McNamara, T. P. (1997). Multiple views of spatial memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*(1), 102-106.
- Sheridan, H., & Reingold, E. M. (2012). Levels of processing influences both recollection and familiarity: Evidence from a modified remember-know paradigm. *Consciousness and Cognition*, *21*(1), 438-443.
- Shumway-Cook, A., Woollacott, M., Kerns, K. A., & Baldwin, M. (1997). The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *52*(4), M232-M240.
- Spiers, H. J., Burgess, N., Hartley, T., Vargha-Khadem, F., & O'Keefe, J. (2001). Bilateral hippocampal pathology impairs topographical and episodic memory but not visual pattern matching. *Hippocampus*, *11*(6), 715-725.
- Spironelli, C., Busenello, J., & Angrilli, A. (2016). Supine posture inhibits cortical activity: Evidence from Delta and Alpha EEG bands. *Neuropsychologia*, *89*, 125-131.
- Spreng, R. N., Mar, R. A., & Kim, A. S. (2009). The common neural basis of autobiographical memory, prospection, navigation, theory of mind, and the default mode: a quantitative meta-analysis. *Journal of cognitive neuroscience*, *21*(3), 489-510.
- Squire, L. R., van der Horst, A. S., McDuff, S. G., Frascino, J. C., Hopkins, R. O., & Mauldin, K. N. (2010). Role of the hippocampus in remembering the past and imagining the future. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(44), 19044-19048.
- Stanney, K. M., Kingdon, K. S., Graeber, D., & Kennedy, R. S. (2002). Human performance in immersive virtual environments: Effects of exposure duration, user control, and scene complexity. *Human performance*, *15*(4), 339-366.
- Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, *437*(7063), 1272-1278.
- Stins, J. F., & Beek, P. J. (2012). A critical evaluation of the cognitive penetrability of posture. *Experimental aging research*, *38*(2), 208-219.
- Stins, J. F., Michielsen, M. E., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2009). Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: Effects of expertise, vision and cognition. *Gait & posture*, *30*(1), 106-109.
- Stins, J. F., Schneider, I. K., Koole, S. L., & Beek, P. J. (2015). The influence of motor imagery on postural sway: differential effects of type of body movement and person perspective. *Advances in Cognitive Psychology*, *11*(3), 77.

- Stins, J., Habets, L., Jongeling, R., & Cañal-Bruland, R. (2016). Being (un) moved by mental time travel. *Consciousness and cognition*, *42*, 374-381.
- Stoffregen, T. A., Hove, P., Bardy, B. G., Riley, M., & Bonnet, C. T. (2007). Postural Stabilization of Perceptual But Not Cognitive Performance. *Journal of Motor Behavior*, *39*(2), 126–138. doi:10.3200/jmbr.39.2.126-138
- Stoffregen, T. A., Pagulayan, R. J., Bardy, B. G., & Hettinger, L. J. (2000). Modulating postural control to facilitate visual performance. *Human movement science*, *19*(2), 203-220.
- Stoffregen, T. A., Smart, L. J., Bardy, B. G., & Pagulayan, R. J. (1999). Postural stabilization of looking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(6), 1641.
- Sun, C., & Harmon-Jones, E. (2020). Supine body posture reduces cognitive conflict processing: Evidence from N450 Stroop interference. *Psychophysiology*. *58*(1). doi :10.1111/psyp.13693
- Swan, L., Otani, H., & Loubert, P. V. (2007). Reducing postural sway by manipulating the difficulty levels of a cognitive task and a balance task. *Gait & Posture*, *26*(3), 470-474.
- Swan, L., Otani, H., Loubert, P. V., Sheffert, S. M., & Dunbar, G. L. (2004). Improving balance by performing a secondary cognitive task. *British Journal of Psychology*, *95*(1), 31-40.
- Tanahashi, S., Ujike, H., & Ukai, K. (2012). Visual rotation axis and body position relative to the gravitational direction: effects on circular vection. *i-Perception*, *3*(10), 804-819.
- Tanahashi, S., Ujike, H., Kozawa, R., & Ukai, K. (2007). Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, *4*(1), 1-11.
- Taube, J. S., Muller, R. U., & Ranck, J. B. (1990). Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis. *Journal of Neuroscience*, *10*(2), 420-435.
- Team R Core. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. 21 Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.r-project.org/>
- Teasdale, N., Bard, C., LaRue, J., & Fleury, M. (1993). On the cognitive penetrability of posture control. *Experimental aging research*, *19*(1), 1-13.
- Teasdale, N., Stelmach, G. E., Breunig, A., & Meeuwse, H. J. (1991). Age differences in visual sensory integration. *Experimental brain research*, *85*(3), 691-696.
- Thakral, P. P., Madore, K. P., & Schacter, D. L. (2019). Content-specific phenomenological similarity between episodic memory and simulation. *Memory*, *27*(3), 417-422.
- Thilo, K. V., & Gresty, M. A. (2002). Visual motion stimulation, but not visually induced perception of self-motion, biases the perceived direction of verticality. *Cognitive brain research*, *14*(2), 258-263.

- Thurrell, A., & Bronstein, A. (2002). Vection increases the magnitude and accuracy of visually evoked postural responses. *Experimental brain research*, 147(4), 558-560.
- Trutoiu, L. C., Mohler, B. J., Schulte-Pelkum, J., & Bühlhoff, H. H. (2009). Circular, linear, and curvilinear vection in a large-screen virtual environment with floor projection. *Computers & Graphics*, 33(1), 47-58.
- Tulving, E. (1972). 12. Episodic and Semantic Memory. Organization of memory/Eds E. Tulving, W. Donaldson, NY: Academic Press, 381-403.
- Tulving, E. (1985). How many memory systems are there?. *American psychologist*, 40(4), 385.
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. *Annual review of psychology*, 53(1), 1-25.
- Tulving, E., Voi, M. E. L., Routh, D. A., & Loftus, E. (1983). Ecphoric Processes in Episodic Memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 302(1110), 361–371. doi: 10.1098/rstb.1983.0060
- Väljamäe, A., Larsson, P., Västfjäll, D., & Kleiner, M. (2009). Auditory landmarks enhance circular vection in multimodal virtual reality. *Journal of the Audio Engineering Society*, 57(3), 111-120.
- Vallet, G., Brunel, L., & Versace, R. (2010). The perceptual nature of the cross-modal priming effect. *Experimental Psychology*.
- Van Damme, I., & d'Ydewalle, G. (2009). Implicit false memory in the DRM paradigm: Effects of amnesia, encoding instructions, and encoding duration. *Neuropsychology*, 23(5), 635.
- Vander Velde, T. J., Woollacott, M. H., & Shumway-Cook, A. (2005). Selective utilization of spatial working memory resources during stance posture. *Neuroreport*, 16(7), 773-777.
- Vander Velde, T., & Woollacott, M. (2008). Non-visual spatial tasks reveal increased interactions with stance postural control. *Brain research*, 1208, 95-102.
- Versace, R., Brouillet, D., & Vallet, G. (2018). *Cognition incarnée: Une cognition située et projetée*. Mardaga.
- Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, E., & Brunel, L. (2014). Act-In: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, 26(3), 280-306.
- Viard, A., Piolino, P., Desgranges, B., Chételat, G., Lebreton, K., Landeau, B., ... & Eustache, F. (2007). Hippocampal activation for autobiographical memories over the entire lifetime in healthy aged subjects: an fMRI study. *Cerebral Cortex*, 17(10), 2453-2467.
- Vuillerme, N., & Nafati, G. (2007). How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological research*, 71(2), 192-200.

- Vuillerme, N., & Nougier, V. (2004). Attentional demand for regulating postural sway: the effect of expertise in gymnastics. *Brain Research Bulletin*, *63*(2), 161-165.
- Vuillerme, N., Nougier, V., & Teasdale, N. (2000). Effects of a reaction time task on postural control in humans. *Neuroscience Letters*, *291*(2), 77–80. doi:10.1016/s0304-3940(00)01374-4
- Wade, M. G., & Jones, G. (1997). The role of vision and spatial orientation in the maintenance of posture. *Physical therapy*, *77*(6), 619-628.
- Wagoner, B. (2017). What makes memory constructive? A study in the serial reproduction of Bartlett's experiments. *Culture & Psychology*, *23*(2), 186-207.
- Waller, D., & Hodgson, E. (2006). Transient and enduring spatial representations under disorientation and self-rotation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*(4), 867.
- Wang, R. F., & Spelke, E. S. (2000). Updating egocentric representations in human navigation. *Cognition*, *77*(3), 215-250.
- Webb, C. M., Estrada III, A., & Kelley, A. M. (2012). The effects of spatial disorientation on cognitive processing. *The International Journal of Aviation Psychology*, *22*(3), 224-241.
- Westerman, D. L. (2008). Relative fluency and illusions of recognition memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*(6), 1196-1200.
- Whittlesea, B. W., Jacoby, L. L., & Girard, K. (1990). Illusions of immediate memory: Evidence of an attributional basis for feelings of familiarity and perceptual quality. *Journal of Memory and Language*, *29*(6), 716-732.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, *3*(2), 159-177.
- Wilkie, R., Raw, R., Mushtaq, F., Rossiter, A., Culmer, P. R., & Mon-Williams, M. Moving ahead through time?
- Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait & posture*, *16*(1), 1-14.
- Woollacott, M., & Vander Velde, T. (2008). Non-visual spatial tasks reveal increased interactions with stance postural control. *Brain research*, *1208*, 95-102.
- Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *54*(4), 1143-1154.
- Yardley, L., Gardner, M., Bronstein, A., Davies, R., Buckwell, D., & Luxon, L. (2001). Interference between postural control and mental task performance in patients with

- vestibular disorder and healthy controls. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 71(1), 48-52.
- Yardley, L., Gardner, M., Leadbetter, A., & Lavie, N. (1999). Effect of articulatory and mental tasks on postural control. *Neuroreport*, 10(2), 215-219.
- Yonelinas, A. P. (1999). The contribution of recollection and familiarity to recognition and source-memory judgments: A formal dual-process model and an analysis of receiver operating characteristics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(6), 1415.
- Yonelinas, A. P. (2013). The hippocampus supports high-resolution binding in the service of perception, working memory and long-term memory. *Behavioural brain research*, 254, 34-44.
- Yonelinas, A. P., & Jacoby, L. L. (1995). The relation between remembering and knowing as bases for recognition: Effects of size congruency. *Journal of memory and language*, 34(5), 622-643.
- Yoshida, S., Nakazawa, K., Shimizu, E., & Shimoyama, I. (2008). Anticipatory postural adjustments modify the movement-related potentials of upper extremity voluntary movement. *Gait & Posture*, 27(1), 97-102.
- You, J. H., Shetty, A., Jones, T., Shields, K., Belay, Y., & Brown, D. (2009). Effects of dual-task cognitive-gait intervention on memory and gait dynamics in older adults with a history of falls: a preliminary investigation. *NeuroRehabilitation*, 24(2), 193-198.
- Young, L. R. (2003). Chapter 3: Spatial orientation. In Tsang P., & Vidulich M., *Principles and practice of aviation psychology*, 69-113.
- Zacks, J. M., Speer, N. K., Swallow, K. M., Braver, T. S., & Reynolds, J. R. (2007). Event perception: a mind-brain perspective. *Psychological bulletin*, 133(2), 273.
- Zaragoza, M. S., & Mitchell, K. J. (1996). Repeated Exposure to Suggestion and the Creation of False Memories. *Psychological Science*, 7(5), 294-300. doi: 10.1111/j.1467-9280.1996.tb00377.x
- Zeidman, P., Mullally, S. L., & Maguire, E. A. (2015). Constructing, perceiving, and maintaining scenes: hippocampal activity and connectivity. *Cerebral Cortex*, 25(10), 3836-3855.
- Zhong, X., & Yost, W. A. (2013). Relationship between postural stability and spatial hearing. *Journal of the American Academy of Audiology*, 24(09), 782-788.
- Zok, M., Mazzà, C., & Cappozzo, A. (2008). Should the instructions issued to the subject in traditional static posturography be standardised?. *Medical engineering & physics*, 30(7), 913-916.

Table des Figures

FIGURE 1: DEROULEMENT DU PHENOMENE D'EXTENSION DE FRONTIERE. TRADUITE DE MAGUIRE, E. A., & MULLALLY, S. L. (2013). THE HIPPOCAMPUS: A MANIFESTO FOR CHANGE. JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY: GENERAL, 142(4), 1180. DISPONIBLE A L'ADRESSE HTTPS://PSYCNET.APA.ORG/FULLTEXT/2013-25332-001.HTML	51
FIGURE 2: POURCENTAGE DE BONNES REPONSES EN FONCTION DE LA POSITION DU PARTICIPANT ET DE LA TACHE MNESIQUE.	122
FIGURE 3: TEMPS DE REPONSE EN MILLISECONDES EN FONCTION DE LA POSITION DU PARTICIPANT ET DE LA TACHE MNESIQUE.	123
FIGURE 4: DEROULEMENT D'UN BLOC EXPERIMENTAL.....	133
FIGURE 5: INDICATEURS POSTURAUX (VITESSE ET ENTROPIE) EN FONCTION DE LA TACHE COGNITIVE ET DE LA DISPONIBILITE DE L'INFORMATION VISUELLE.	136
FIGURE 6: ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP) SUR LA DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE DU SIGNAL POSTURAL SELON L'AXE ANTERO-POSTERIEUR.....	138
FIGURE 7: ILLUSTRATION DES DIFFERENTS AXES DE ROTATION POSSIBLES (ADAPTE DE HTTPS://WWW.SCI-SPORT.COM/THEORIE/CHAPITRE-2-DESCRIPTION-ANATOMIQUE-DU-MOUVEMENT.PHP).....	148
FIGURE 8: ILLUSTRATION DU DISPOSITIF UTILISE POUR GENERER UNE VECTION EN ROULIS.....	172
FIGURE 9: POURCENTAGE DE BONNES REPONSES EN FONCTION DE LA TACHE MNESIQUE (I.E., EPISODIQUE OU SEMANTIQUE) ET DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL (I.E., STATIQUE OU MOUVEMENT ANGULAIRE UNIFORME).	175
FIGURE 10 : TEMPS DE REPONSE EN MILLISECONDES EN FONCTION DE LA TACHE MNESIQUE (I.E., EPISODIQUE OU SEMANTIQUE) ET DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL (I.E., STATIQUE OU MOUVEMENT ANGULAIRE UNIFORME).	176
FIGURE 11 : IMAGE DU PATTERN DE POINTS UTILISE POUR GENERER LES VIDEOS DE MOUVEMENT UNIFORME ET NON UNIFORME.	184
FIGURE 12 : DEROULEMENT D'UN BLOC DE L'EXPERIENCE PRELIMINAIRE AVEC LES INFORMATIONS PRESENTEES VISUELLEMENT (EN ORANGE), LES TACHES DU PARTICIPANT (EN NOIR) ET LES PERIODES D'ENREGISTREMENT POSTURALES UTILISEES POUR LE CALCUL DES INDICES POSTURAUX (EN BLEU).....	186
FIGURE 13 : DEVIATION MOYENNE DU CENTRE DE PRESSION SOUS LES PIEDS EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT VISUEL PRESENTE (I.E., STATIQUE, MOUVEMENT UNIFORME, MOUVEMENT NON UNIFORME) POUR L'AXE MEDIO-LATERAL ET ANTERO-POSTERIEUR. ...	188

FIGURE 14 : DEROULEMENT D'UN BLOC DE L'EXPERIENCE PRINCIPALE AVEC LES INFORMATIONS PRESENTEES VISUELLEMENT (EN ORANGE), LES TACHES DU PARTICIPANT (EN NOIR) ET LES PERIODES D'ENREGISTREMENT POSTURALES UTILISEES POUR LE CALCUL DES INDICES POSTURAUX (EN BLEU).....	197
FIGURE 15 : VARIANCE AUTOUR DE LA POSITION MOYENNE DU CENTRE DE PRESSION SOUS LES PIEDS SUR L'AXE MEDIO-LATERAL EN MILLIMETRES POUR LA TACHE DE MEMOIRE EPISODIQUE ET SEMANTIQUE DANS LES DEUX CONDITIONS DE MOUVEMENT VISUEL (I.E., UNIFORME ET NON UNIFORME).	200
FIGURE 16 : ENTROPIE DU SIGNAL POSTURAL SUR L'AXE MEDIO-LATERAL EN MILLIMETRE POUR LA TACHE DE MEMOIRE EPISODIQUE ET SEMANTIQUE DANS LES DEUX CONDITIONS DE MOUVEMENT VISUEL (I.E., UNIFORME ET NON UNIFORME).....	201

ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

Annexe I : Listes de mots utilisées pour la tâche de mémoire épisodique	255
Annexe II : Items utilisés pour la tâche de mémoire sémantique et réponse correcte associée.....	256
Annexe III : Expérience 2, article publié dans motor control: “The Interaction Between Long-Term Memory and Postural Control: Different Effects of Episodic and Semantic Tasks”.....	257
Annexe IV : Tableau des reports subjectifs de la vection pour l’Expérience 3 : latence de la vection, temps passé en vection et nombre d’épisodes de vection pour chaque participant.....	275
Annexe V : Article publié dans PloS One , Expériences 4 et 5	276

Annexe I : LISTES DE MOTS UTILISEES POUR LA TACHE DE MEMOIRE EPISODIQUE

LISTE 1

Le palmier
La cigogne
L'écharpe
Le râteau
L'avion
Le concombre
L'accordéon
Le poignard
La limonade
Le muguet
Le saumon
Le menuisier
La coccinelle
L'escrime
La framboise
La casserole
La chèvre

LISTE 2

Le scarabée
Le tilleul
Le gilet
Le café
L'abricot
La natation
La tenaille
La harpe
La sardine
L'épinard
La vache
La jonquille
Le dentiste
La carabine
La passoire
Le corbeau
Le train

LISTE 3

L'arbalète
Le thon
Le peignoir
La cigale
La louche
L'orchidée
La pioche
Le raisin
Le canari
Le thé
Le platane
Le comptable
Le chien
L'athlétisme
Le poivron
La clarinette
La voiture

**Annexe II : ITEMS UTILISES POUR LA TACHE DE
MEMOIRE SEMANTIQUE ET REPONSE CORRECTE
ASSOCIEE**

Mot 1	Mot 2	Bonne réponse	Mot 1	Mot 2
La fourche	La cymbale	Flexibilité	La bouteille	La clef
Le radiateur	Le donjon	Flexibilité	Le magazine	La tente
La poire	Le cintre	Flexibilité	La couleuvre	Le tapis
Le revolver	La table	Flexibilité	La couverture	Le nénuphar
Le stylo	La marmite	Flexibilité	Le dé	La vitre
Le navet	Le téléviseur	Flexibilité	La trousse	Le sac à dos
La photographie	La laitue	Flexibilité	La robe	La ficelle
Le ver de terre	Le tapis	Flexibilité	La crêpe	Le pull
L'éponge	La brique	Forme	La pizza	La roue
Le léopard	Le sabot	Forme	Le hibou	Le frigidaire
Le champignon	L'entonnoir	Forme	La grue	Le sapin
Le mouton	Le camion	Forme	La pâquerette	La bouteille
Le canapé	La règle	Forme	La péniche	Le surimi
Le bambou	L'allumette	Forme	L'immeuble	La girafe
L'épée	Le serpent	Forme	Le poireau	Le ski
La tulipe	Le lampadaire	Forme	L'olive	Le hérisson
La vis	L'abeille	Poids	Le coton tige	La sauterelle
Le mouchoir	Le colibri	Poids	La pantoufle	La pomme
La trompette	La poule	Poids	La trottinette	Le chat
Le cachalot	Le baobab	Poids	Le t-shirt	Le kiwi
Le trombone	L'élastique	Poids	Le livre	Le cobaye
L'œuf	La banane	Poids	Le post-it	L'aiguille
Le chevet	Le renard	Poids	La noix	La jacinthe
La mûre	Le clou	Poids	La sucette	La bague

Annexe III : EXPÉRIENCE 2, ARTICLE PUBLIÉ DANS MOTOR CONTROL: “THE INTERACTION BETWEEN LONG-TERM MEMORY AND POSTURAL CONTROL: DIFFERENT EFFECTS OF EPISODIC AND SEMANTIC TASKS”

Motor Control, (Ahead of Print)
<https://doi.org/10.1123/mc.2020-0061>
© 2020 Human Kinetics, Inc.



ARTICLE

The Interaction Between Long-Term Memory and Postural Control: Different Effects of Episodic and Semantic Tasks

Maëlle Tixier

Université Grenoble Alpes

Corinne Cian

Université Grenoble Alpes and
Institut de Recherche Biomédicale des Armées

**Pierre-Alain Barraud, Rafael Laboissiere, and Stéphane
Rousset**

Université Grenoble Alpes

The aim of this experiment was to investigate the postural response to specific types of long-term memory (episodic vs. semantic) in young adults performing an unperturbed upright stance. Although a similar level of steadiness (mean distance) was observed, dual tasking induced a higher velocity, more energy in the higher frequency range (power spectral density), and less regularity (sample entropy) compared with a simple postural task. Moreover, mean velocity was always greater in the semantic than in the episodic task. The differences in postural control during dual tasking may result from the types of processes involved in the memory task. Findings suggest a spatial process sharing between posture and episodic memory.

Keywords: dual tasking, spatial processing, episodic memory, semantic memory

Tixier, Cian, Laboissiere, and Rousset are with the Université Grenoble Alpes, CNRS LPNC UMR 5105, Grenoble, France. Cian is with the Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Brétigny sur Orge, France. Barraud is with the Université Grenoble Alpes, CNRS, CHU Grenoble-Alpes, Grenoble INP, TIMC-IMAG, Grenoble, France. Rousset (stephane.rousset@univ-grenoble-alpes.fr) is corresponding author.

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

Postural control in everyday life is generally accompanied by posture unrelated cognitive activity. However, a large body of research has shown that balance and cognitive tasks (i.e., suprapostural tasks) may interfere with each other (for a review, see [Bayot et al., 2018](#)). The pattern of observed interaction between postural and suprapostural tasks varies across studies from postural (or cognitive) facilitation or interference (one performance remains stable while the other improves or deteriorates) to mutual facilitation or interference (performance of both tasks improves or deteriorates) (for a review, see [Plummer et al., 2013](#)).

Several theoretical frameworks have been proposed for explaining such patterns of results. The decline in performance of either balance or cognitive tasks may be caused by the limited processing capacity of the brain (capacity-sharing theory; [Woollacott & Shumway-Cook, 2002](#)). For some authors, two tasks will interfere with each other only if they require common limited resources ([Navon & Gopher, 1979](#); [Wickens, 1980](#)) or when the two tasks need the same neural networks ([Pashler, 1994](#); [Tombu & Jolicoeur, 2003](#)). According to the ecological approach ([Riccio & Stoffregen, 1991](#)), postural control could be modulated in order to facilitate the performance of suprapostural tasks ([Stoffregen, Hove, Bardy, Riley, & Bonnet, 2007](#)). For example, people may reduce sway to maintain visual or auditory contact with the environment in order to enhance performance in suprapostural tasks involving perceptual-motor demands (perceptual load). Finally, the Adaptive Resource Sharing framework ([Mitra, 2003](#); [Mitra & Fraizer, 2004](#)) suggests that the interaction between postural and suprapostural tasks depends upon the level of cognitive load and accuracy as well as the postural task demand. When balancing is easy (i.e., no perturbation), performance can be aided by postural adjustments. However, it subsumes resource competition when the accuracy requirements and cognitive load of the suprapostural task are high and the postural task is also demanding (without imminent loss of balance). In such situations, the system does not have the means to carry out facilitation actions and must give priority to either postural or cognitive tasks.

The level of interference may be related to the nature of the cognitive tasks used. It has been suggested that spatial processing is primarily what is shared between cognitive tasks and postural control ([Chong et al., 2010](#); [Kerr, Condon, & McDonald, 1985](#); [Maylor & Wing, 1996](#); [Maylor, Allison, & Wing, 2001](#); [Vander Velde & Woollacott, 2008](#); [VanderVelde, Woollacott, & Shumway-Cook, 2005](#)). Since stance balance has spatial components, cognitive tasks that have spatial processing requirements might create a greater dual-task effect. With Baddeley's model as a framework, the field of working memory (WM) is the predominant means of studying posture-cognition interaction for spatial and nonspatial tasks. Indeed, spatial and nonspatial tasks can be equalized in terms of difficulty and resources involved. In comparison with a standing nonspatial WM task, spatial WM tasks improve balance ([Maylor et al., 2001](#); [Ramenzoni, Riley, Shockley, & Chiu, 2007](#)). However, when the postural constraints were increased, the reverse was observed ([Chen, Yu, Niu, & Liu, 2018](#); [Vander Velde & Woollacott, 2008](#)).

Different postural sway patterns were found according to the phase of the memory task (either encoding, maintenance, or retrieval phase). For instance, standing participants were more stable when encoding than when maintaining stimuli (Maylor et al., 2001); they also sway more during retrieval than during encoding (Maylor & Wing, 1996). However, these differences also depend on the presence or absence of a visual frame of reference (or perceptual load) for postural and cognitive tasks (Riley, Mitra, Saunders, Kiefer, & Wallot, 2012).

While dual-task paradigms have been used with a variety of WM tasks being performed concurrently with different postural tasks, less is known about long-term memory and postural control interference. Few studies used autobiographical memory tasks while participants maintained different postures (Dijkstra, Kaschak, & Zwaan, 2007; Miles, Nind, & Macrae, 2010). It is worth noting that postural tasks aimed to prime recollection. For instance, it has been shown (Dijkstra et al., 2007) that when participants relive an event experienced in their everyday life associated with a prototypical posture, the recall of the event was facilitated when this postural position was used as prime (e.g., dentist episodes are better recalled when participants are lying down). Some studies use postural tasks not as prime but as a competing activity. In this dual-task paradigm, differential prioritization of tasks depending on age was observed when participants had to perform an episodic memory task while walking (Li, Lindenberger, Freund, & Baltes, 2001). Dual-task cost is higher for older than younger adults for the walking task, whereas the dual-task cost for the memory task is similar for both groups. However, in contrast to classical list learning used in the episodic memory experiment, the authors asked their participants to use the method of loci (i.e., assigning an imaginary location to each word, and at retrieval time, navigate mentally between these different locations to retrieve learned words). The similarity of this episodic recall task to an explicit mental spatial navigation task can explain these results. Whether or not these experiments suggest an interaction between long-term memory and posture, no conclusion can be drawn about the effects of spatial and nonspatial memory content on postural stability compared to those observed for WM tasks.

In order to determine how postural control is influenced by long-term memory tasks that differed in the spatial processes involved, we compared the effects of an episodic (i.e., source recall) and a semantic task. Episodic memory induces an indirect spatial processing. For instance, someone can remember, with a verbal cue only, an event from his last holidays, including where he was, friends or family who were present, emotions, sounds, and other perceptual details. This phenomenon is combined with a sensation of reliving the past like “mental time travel” (Tulving, 2002). The hypothesis of spatial processing during remembering is well supported by behavioral (Cerles, Guinet, & Rousset, 2015; Gomez, Rousset, & Baciú, 2009) and functional magnetic resonance imaging studies (Bicanski & Burgess, 2018; Burgess, Maguire, & O’Keefe, 2002). Scene construction theory (Hassabis & Maguire, 2007; Maguire & Mullally, 2013) assumes that remembering is an activity of multimodal scene construction. This view reconciles hippocampal

involvement in a range of tasks that seemed to have little in common: imagination, memory, prospective thinking, theory of mind tasks, and so on. (Clark et al., 2019). In this way, even when the central object of remembering is not spatial, spatial processing is nevertheless engaged during recollection. Indeed, since reconstruction is based on scene construction, recollection needs spatial processes to operate. Spatial processes' involvement in episodic memory is demonstrated by interference between a spatial pointing task and a source recall episodic task that did not require spatial responses (i.e., determining in which list a word has been previously learned; Cerles et al., 2015). This result suggests that recollection needs a spatial process to be effective even when the content of the episode to be retrieved is not spatial per se or is not spatially defined within a scene (e.g., left/right, front/back). Accordingly, this dual-task interference was not observed when using a semantic memory task of equivalent difficulty. Indeed, semantic memory refers to general knowledge about the world (e.g., "I know that wheels are circular"); as such, it does not involve a specific past event and, thus, spatial processing through scene construction.

The aim of this experiment was to investigate the postural response to specific types of long-term memory (episodic vs. semantic) in young adults performing an unperturbed upright stance. As the balancing component was relatively easy (eyes open, feet hip-width apart), we expected variations in the organization of postural sway according to the spatial content of the memory task (episodic vs. semantic) rather than postural destabilization. An additional experimental condition was included in which the visual field provides no information about postural sway (eyes closed). Having to maintain an upright stance when eyes are closed would slightly challenge postural balance, as a source of information is suppressed. In line with the spatial resource-sharing hypothesis, we expected a stronger susceptibility of postural mechanisms to dual-task interference specific to the spatial content of the cognitive task.

Materials and Methods

Participants

The data were obtained from 24 paid healthy volunteers (13 females and 11 males; mean \pm SD: age = 20.54 \pm 1.7 years, height = 170.48 \pm 8.90 cm, and weight = 65.23 \pm 13.66 kg). All participants had normal or corrected-to-normal vision and audition, they reported no history of balance or neuromuscular disorder, and they took no drugs that may affect cognitive functions or balance. Participants were unaware of the aim of the study and gave their informed and written consent prior to their inclusion. They were free to withdraw from the experiment at any time. The research was performed in accordance with the ethical standards specified by the 1964 Declaration of Helsinki and approved by the institutional ethics committee of the Université Grenoble Alpes (IRB00010290-2017-10-03-26).

Postural Control Setup

Static posturography was measured with a force-sensitive platform equipped with four strain gauges linked to a computer (Laboissiere et al., 2015). This setup was used to record the displacements of the center of feet pressure (CoP) in the horizontal plane with a sampling frequency of 100 Hz. With regard to the position of the CoP, the mean imprecision for a 70-kg load applied on the center of the platform was <0.1 mm. The antero-posterior (AP) and medio-lateral axes were defined as being parallel to the horizontal borders of the platform.

Memory Tasks

Both tasks have been adapted from the Cerles et al. (2015) study evidencing differential interference of episodic and semantic memory task with a spatial task. These tasks allow us to compare, in the same setting, episodic and semantic memory while maintaining similar difficulty, similar mental imagery demand, and similar response options. These tasks are described below.

Episodic memory. Before the experiment, participants learned three lists of 17 words (including objects, animals, and plant names). During the learning, participants sat on a chair in front of a table. The first list was read from a paper, the second was hand-copied on a sheet of paper, and the third was presented on a laptop with words appearing one by one in the center of the screen (15-in. screen). Eachlist was presented three times during a 2-min period. Each presentation was followed by a free recall and a cued recall (i.e., when a word was not recalled correctly, the experimenter gave the participant the object category as a cue). This task was presented as a short-term memory task, and instructions specified the need to recall as many words as possible in 1 min directly after the 2-min presentation. Thus, participants were not aware of the real purpose of this learning (that is, the source recall during postural control). For the source recall, participants heard one of the previously learned words and had to determine as accurately and quickly as possible to which list it belonged. They answered orally either “list,” “copy,” or “screen.”

Semantic memory. Participants had to compare two objects, animals, or plants on three features: shape, flexibility, and weight. They had to respond as accurately and quickly as possible regarding which feature was most similar to both items. They answered orally either “flex,” “shape,” or “weight.” For instance, the common point between a wheel and a pizza is the shape. Indeed, their weights are not similar, and a pizza is malleable whereas a wheel is rigid, excluding the flexibility answer as well.

During the semantic task and the recall of the episodic task, participants were wearing headphones for presentation of auditory stimuli displayed by E-Prime 2.0 Professional (PsychologySoftwareTools, Inc., Pittsburgh, PA).

Procedure

Once word lists in the episodic memory task were learned, participants were taken to a second room where the posturographic device was located. Instructions were delivered by the experimenter for maintenance of posture and cognitive tasks. Postural task requirements remained constant throughout the experiment. Barefoot participants were asked to stand relaxed on the force platform with feet hip-width apart and let their arms suspend naturally at their sides. Their eyes were either open or closed. During the measurement with eyes open, they were asked to look straight ahead at a grid pattern located 1.5 m in front of them. Each subject's feet were traced on the platform to ensure that initial placement of the feet was the same whenever the participant returned from a rest interval. Prior to testing, participants performed three trials in each memory task and 1 min of static posture for "eyes-closed" and "eyes-open" conditions for familiarization with the postural task.

The experiment included eight blocks: four blocks with eyes closed and the remaining blocks with eyes open. The order of blocks was counterbalanced. They were separated by 2 min of rest, with participants sitting on a chair. Each block began with the standing task performed alone (simple postural task), followed by the episodic and semantic tasks. The order of memory tasks was counterbalanced between blocks and vision conditions. Memory tasks were separated by a 10-s interval during which new instructions were delivered. Six trials for the episodic task and six trials for the semantic task were performed in each block. For both memory tasks, response time was limited to 3 s, and a 5-s break was left to the participants between two trials. Each postural record (no task, episodic task, and semantic task) lasted 54 s. Thus, one block took about 3 min (see Figure 1).

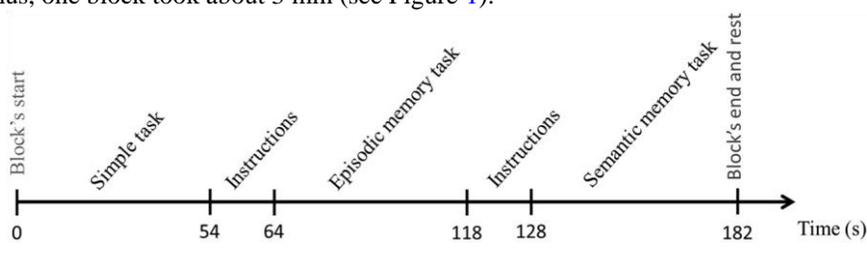


Figure 1 — Time sequence of tasks during one block. The simple task always came first; then, episodic and semantic task order was counterbalanced in within-subjects design. Each block was performed either with the eyes closed or the eyes open. Length of postural recording was the same for each task.

Data Analysis

Thirteen of the 576 postural records were excluded from analyses because foot placement was altered from the initial position.

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

Memory performance. Memory task performance was measured as the percentage of correct responses. All responses higher than 3 s were considered as incorrect.

Postural parameters. Five parameters were computed for each block (i.e., one to eight) and each task (i.e., episodic, semantic, and posture only). To assess the postural performance, two stabilometric parameters were computed from the two dimensional, filtered CoP signal for each postural record: the mean value of the magnitude of the tangential velocity vector of the CoP trajectory, and the mean distance between the CoP instantaneous position and the CoP center point for the individual trial (see [Prieto, Myklebust, Hoffmann, Lovett, & Myklebust, 1996](#)). To give insight into the regularity of CoP trajectories, the sample entropy in the AP direction was determined using the method developed by Richman et al. (2011). The calculation parameters were set to typical values: $m = 3$ and $r = .3$ ([Ramdani, Seigle, Lagarde, Bouchara, & Bernard, 2009](#)). All computations were performed with the R software ([R Core Team, 2018](#)). Finally, in order to analyze the power spectral density, the frequency spectrum of the AP time series was computed using the `psdcore` function of the `psd` R package ([Barbour & Parker, 2014](#)), which estimates the power spectrum density (PSD) of the signal using sine multitapers. We used the default number of five sine tapers at each frequency ([Laboissiere et al., 2015](#)). The amplitude of the PSD was transformed in decibels and interpolated at 200 frequency points, spaced equally along a logarithmic scale between 0.02 and 2 Hz. Each postural trail was then represented by the PSD profiles in the AP direction as 200-dimensional vectors. The PSD profiles of the whole population were further characterized with a low number of parameters by using principal component analysis. Principal component analysis was performed using the `prcomp` function in R. The values of the projections onto the first two principal component (PC) axes were used in the statistical analysis. The PC axes were reoriented such that positive loadings correspond to profiles that are above the mean profile at the initial frequency 0.02 Hz.

Statistical Analyses

Five dependent variables were considered in this study: mean velocity, mean distance, sample entropy in the AP direction, and values of the projections onto the first two PC of the PSD profiles in the AP direction. Mixed-effect models were fitted to the data, considering the task (episodic vs. semantic) and the vision (eyes open vs. eyes closed) as fixed factors. The order of the blocks was considered as a fixed, continuous factor. Interindividual differences were taken into account by adding the variation in intercept among the subjects as a random factor in the model. Model fitting was performed with the `lmer` function of the `lme4` R package ([Bates, Maechler, Bolker, & Walker, 2015](#)). Statistical significance was assessed with the analysis of variance function (for the fixed effects) and the `ranova` function (for the random effect). F tests and p values were obtained using Satterthwaite's method for denominator degrees of freedom and F statistic. The random effect

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

significance was assessed with the likelihood ratio test. Results were considered statistically significant for $p < .05$. Mean values for the different levels of the dependent variables were computed as estimated marginal means based on the mixed-effects fitted models, using the emmeans R package (Lenth, 2019).

Results

Memory Performance

Both tasks were performed with an equivalent level of correct answers (mean episodic = 69.4%, mean semantic = 71.5%, standard error [SE] = 0.16, $p = .24$), and performances were clearly above the chance level (i.e., 33%, $p < .001$). There were no significant main effects of task or vision nor interaction (all p 's $> .05$). These results suggest that episodic and semantic tasks were of comparable levels of difficulty whatever the vision condition.

Postural Measures

For mean distance, a main effect of vision, $F(1, 435.06) = 4.37$, $p < .01$, was observed. Eyes-closed condition resulted in a greater mean distance (mean closed = 4.73 mm, mean open = 4.17 mm, SE = 0.13). No significant main effect of memory task ($p = .51$) nor interaction was found ($p = .54$). For mean velocity (see Figure 2a), there were significant main effects of vision, $F(1, 434.99) = 45.00$, $p < .001$, and task, $F(2, 435) = 4.52$, $p < .001$, but no interaction between these factors ($p = .52$). Velocity was higher for eyes closed than eyes open (mean closed = 8.34 mm/s, mean open = 6.71 mm/s, SE = 0.43). Velocity was slower during the simple task than during the dual task (mean simple postural task [ST] = 6.61 mm/s, mean dual task (DT) = 7.53 mm/s, SE = 0.41, $p < .05$). Moreover, CoP displacements were faster during semantic than during episodic tasks (mean semantic = 7.71 mm/s, mean episodic = 7.33 mm/s, SE = 0.43, $p < .05$). For sample entropy (see Figure 2b), a main effect of vision was highlighted, and higher entropy was measured during the eyes-closed condition (mean closed = 0.042, mean open = 0.039, SE = 0.003, $p < .05$). A main effect of task was also found, with higher entropy during memory task completion than during a simple task situation (mean ST = 0.036, mean DT = 0.043, SE = 0.003, $p < .05$). No differential effect between episodic and semantic memory was found (mean semantic = 0.043, mean episodic = 0.043, SE = 0.003, $p = .95$).

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

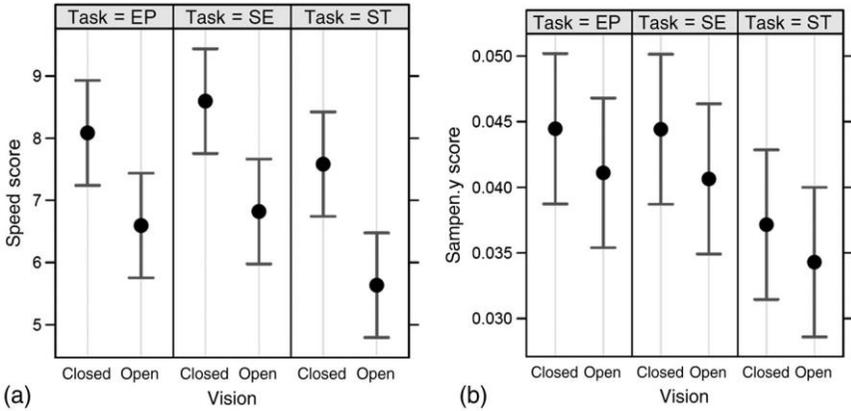


Figure 2 — (a) Mean velocity (speed score in millimeters per second) and (b) sample entropy in the AP direction (SampEn score) depending on cognitive task and vision conditions. Vertical bars correspond to 95% CIs of the estimated means. EP = episodic; AP = antero-posterior; SE = semantic; ST = simple postural task; CI = confidence interval.

For power spectral density, the loadings of the first two PCs obtained from the principal component analysis applied to the APPSD data are shown in Figure 3. These two components accounted for 77.7% of the total variance (63.3% and 14.4%, respectively). AP-PC1 accounts for the tendency of a participant to use more or less energy uniformly across the entire frequency range (Figure 3a). AP-PC2 represents the balance between low and high frequencies, with a pivoting frequency around 0.15Hz (Figure 3c). For AP-PC1, a main effect of vision was emphasized, $F(1, 435) = 34.76, p < .05$ (Figure 3b), with higher energy uniformly across the entire frequency range during the eyes closed condition. A main effect of task was also found, $F(2, 435) = 4.39, p < .05$ (Figure 3b), with less energy during the simple than during the dual-task condition (mean ST = -0.15, mean DT = 0.09, SE = 0.134, $p < .05$). No interaction between these factors was found. For AP-PC2, a main effect of vision was observed, $F(1, 434.98) = 23.32, p < .05$ (Figure 3d); the PSD profile had more energy in the low frequencies for the eyes open than for the eyes closed condition, and the reverse was observed for higher frequencies. A significant main effect of the task was also found, $F(2, 434.99) = 5.63, p < .05$ (Figure 3d). There was more energy in the low frequencies below 0.15 Hz for the simple task compared with the dual one (mean ST = 0.282, mean DT = -0.15, SE = 0.153). The opposite pattern was observed for frequencies in the range (0.15–2.0 Hz).

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

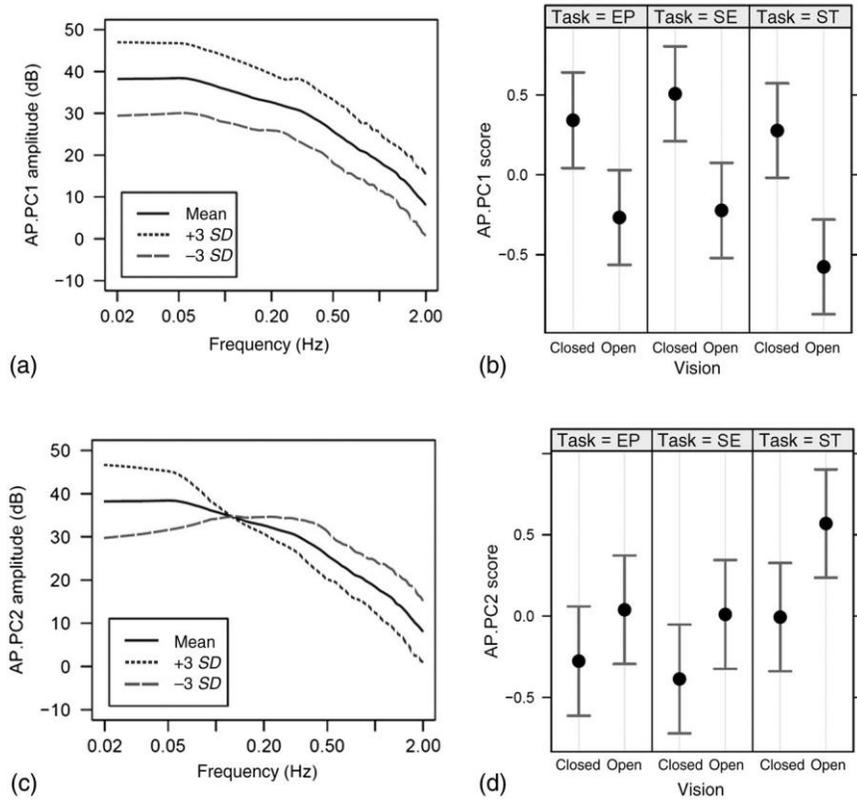


Figure 3 — PCA loadings and scores for the PSD analysis of AP sway. (a) Loadings for the first PC of AP sway. The population mean of the PSD profiles is shown by the black curve. Dotted and dash-dotted curves represent, respectively, how the amplitude spectrum changes for +3 SD and -3 SD along the first PC. (b) Estimated marginal means for the scores along the first PC for each condition (dots). Vertical bars correspond to 95% CIs of the estimated means. (c) Loadings for the second PC of AP sway. Same conventions as in Panel A. (d) Estimated marginal means for the scores along the second PC. Same conventions as in Panel B. EP = episodic; AP = antero-posterior; SE = semantic; ST = simple postural task; CI = confidence interval; PCA = principal component analysis; PSD = power spectrum density; PC = principal component.

Discussion

By asking participants to perform two different long-term memory tasks that had similar difficulty but differed in the processes involved, our purpose was to provide greater insight as to which factor will produce interference with postural control.

The main results showed that having to maintain an upright stance under conditions that slightly challenge balance (eyes closed) did not affect cognitive task performance. However, these concurrent cognitive tasks have an impact on postural performance even when the balancing component was relatively easy (hip-width stance with eyes open). Moreover, participants were differentially controlling their balance according to the memory task. In the following sections, we will discuss our findings with regard to dual-task literature, theoretical implications of the results in the field of the spatial resource-sharing hypothesis, and the effect of postural challenge on dual tasking.

Dual Versus Simple Task: A way to Evaluate a Global Long-term Memory Effect on Posture

While mean distance did not change significantly with tasks, mean velocity was always greater in the dual task than in the simple postural task. Mean distance has been related to the stability achieved by the postural control system, and mean velocity to the amount of regulatory activity associated with this level of stability (Hufschmidt, Dichgans, Mauritz, & Hufschmidt, 1980; Maki, Holliday, & Fernie, 1990; Prieto et al., 1996). Thus, participants have attained a similar level of steadiness whatever the condition, but the activity of the postural control system may have increased during the dual task to achieve this level of steadiness. CoP trajectories were also less regular (as indexed by an increase in sample entropy) when dual tasking. A direct relation between CoP regularity and the amount of attention invested in postural control has been proposed (Donker, Roerdink, Greven, & Beek, 2007; Roerdink et al., 2006), with a higher entropy indicating that balancing requires less attention (Stins, Michielsen, Roerdink, & Beek, 2009). Changes in CoP regularity may be produced by a reallocation of attention. As the attention must be directed toward the concurrent task, postural regulations might thus be controlled at the level of automatic processes (Donker et al., 2007; Polskaia, Richer, Dionne, & Lajoie, 2015; Woollacott & Shumway-Cook, 2002; Wulf, McNevin, & Shea, 2001). It has been suggested that a more automatic postural control is also characterized by higher frequency of postural adjustments (McNevin, Shea, & Wulf, 2003). In that way, more energy in the higher frequency range was observed when dual tasking.

Finally, the differences in the spectral characteristics of the CoP signal may be related to differences in the relative contribution of vestibular, visual, and somatosensory systems for the maintenance of upright stance. Information from these systems is integrated and processed depending on the task and the environment (Horak, 2006; Oie, Kiemel, & Jeka, 2002). It was originally suggested that within the neural pathway for postural stabilization, each of these three systems has a separate frequency range for optimal operation—that is, low frequencies account for visual regulation, medium frequencies for vestibular/somaesthetic, and high frequencies for proprioceptive participation (>2 Hz) (Amblard, Crémieux, Marchand, & Carblanc, 1985; Golomer & Dupui, 2000; Horak & Nashner, 1986; Nashner, 1970). Thus, the increase of sway

frequency observed during the dual task may be related to change in the weighing of sensory information (for a review, see [Peterka, 2018](#)). In that way, vestibular control of balance has been shown to be enhanced with the addition of a cognitive task ([McGeehan, Woollacott, & Dalton, 2017](#)). This may induce higher frequency sway during dual tasking as observed in this experiment.

Besides the shift in attentional resources, another possible explanation for changes in postural sway could be due to the motor requirements of the cognitive task. Participants were instructed to provide vocal responses during postural sway measurements. It has been shown that muscle activity associated with vocalization may have contributed to the increase in velocity and frequency ([Dault, Yardley, & Frank, 2003](#)). However, articulation during the spoken cognitive task may not be the only explanation of the changes in postural sway during dual tasking. Indeed, differences were observed between semantic and episodic tasks, whereas the same number of words of the same length were used. In this case, the difference between the two dual-tasking situations cannot be attributed to procedural differences.

Postural Responses to Specific Types of Long-term Memory: Episodic Versus Semantic Task

The concurrent cognitive tasks have a different impact on postural performance. Mean velocity was always greater in the semantic than in the episodic task, whatever the vision condition. It has been shown that the type of cognitive processes involved in the suprapostural task display different levels of interaction with postural control ([Pellecchia, 2003](#); [Woollacott & Shumway-Cook, 2002](#)). The lower velocity observed in the episodic task may be related to several data in the literature, which reported balance differences when participants performed a WM spatial task compared with a verbal one ([Maylor et al., 2001](#); [Ramenzoni et al., 2007](#)). Indeed, both memory tasks have a mental imagery component with no need of a perceptual contact with the environment, but they differ with respect to the spatial process involved. A scene with a spatial context has to be generated in an episodic task. In contrast, a semantic task implies an object evocation outside of any spatial context.

However, an increase in CoP velocity is also thought to represent a decreased ability to maintain an upright stance. Higher velocity could be linked to a greater difficulty of cognitive task ([Pellecchia, 2003](#); [Woollacott & Shumway-Cook, 2002](#)) or a greater amount of attention required in the cognitive task ([Balasubramaniam, Riley, & Turvey, 2000](#); [Huxhold, Li, Schmiedek, & Lindenberger, 2006](#); [Pellecchia, 2003](#); [Riley, Baker, & Schmit, 2003](#)). Although we cannot completely rule out these possibilities, results suggest that episodic and semantic tasks were of comparable levels of difficulty and induced the same level of attention while dual tasking as the same regularity of CoP fluctuations were observed.

Increasing Balance Challenge: Effect of Visual Deprivation on Dual Tasking

The results of this study were in agreement with previously reported data showing an increase in the mean distance and velocity in the absence of visual input in young adults (Prieto et al., 1996). In the same way, participants with eyes open used less energy uniformly across the entire frequency range. At variance with some results in the literature (Donker et al., 2007; Stins et al., 2009), CoP irregularity has been observed to increase with task difficulty (i.e., higher entropy was found when balancing with eyes closed). However, large entropy may also be associated with less effective postural control when associated with a larger CoP (Borg & Laxaback, 2010). Accordingly, to maintain an upright stance when eyes are closed would slightly challenge postural balance compared with postural control with eyes open.

It has been shown that the performance of postural and/or cognitive tasks could deteriorate due to the increase of postural constraints (see Fraizer & Mitra, 2008). Furthermore, when visuospatial processing was involved, eye closure during standing balance improved WM performance (Chong et al., 2012). Our results showed that cognitive performance remained unchanged across the different postural conditions. However, improvement in the literature concerned mainly the response time and the first trial. In the present study, only the accuracy was measured, and the average of all the trials was used. Further experiments are needed to support the benefit of eye closure on long-term memory according to its visuospatial content. Finally, the differences in postural parameters observed between cognitive tasks were not more pronounced for the vision suppression condition. One explanation is that the postural task used in this study is not difficult enough to further interact with cognitive tasks.

Conclusion

In conclusion, the differences in postural control during dual tasking result from the type of processes involved in the memory task. Findings suggest a spatial process sharing between posture and long-term memory. Indeed, they replicate the differential effect on postural stability of the spatial and nonspatial components of the suprapostural task already observed for WM (Maylor et al., 2001). Moreover, it can be suggested that dual tasking induces a reorganization of postural sway (i.e., the way posture is usually maintained had to be slightly changed to be able to perform the memory task depending on the cognitive processes involved) rather than a destabilization. The relationship between the spatial property of episodic memory and postural control was suggested at the behavioral level. To provide further evidence of the selective effect of long-term memory on postural control, future research would explore to which extent both tasks involve common brain regions.

References

- Amblard, B., Crémieux, J., Marchand, A.R., & Carblanc, A. (1985). Lateral orientation and stabilization of human stance: Static versus dynamic visual cues. *Experimental Brain Research*, 61(1), 21–37. PubMed ID: [4085597](#) doi:[10.1007/BF00235617](#)
- Balasubramaniam, R., Riley, M.A., & Turvey, M.T. (2000). Specificity of postural sway to the demands of a precision task at sea. *Gait and Posture*, 11(1) 12–24. PubMed ID: [10664481](#) doi:[10.1016/S0966-6362\(99\)00051-X](#)
- Barbour, A.J. and Parker, R.L. (2014). psd: Adaptive, sine multitaper power spectral density estimation for R. *Computers & Geosciences*, 63, 1–8. doi:[10.1016/j.cageo.2013.09.015](#)
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. doi:[10.18637/jss.v067.i01](#)
- Bayot, M., Dujardin, K., Tard, C., Defebvre, L., Bonnet, C.T., Allart, E., & Delval, A. (2018). The interaction between cognition and motor control: A theoretical framework for dual-task interference effects on posture, gait initiation, gait and turning. *Neurophysiologie Clinique*, 48(6), 361–375. PubMed ID: [30487064](#) doi:[10.1016/j.neucli.2018.10.003](#)
- Bicanski, A., & Burgess, N. (2018). A neural-level model of spatial memory and imagery. *ELife*, 7, e33752. PubMed ID: [30176988](#) doi:[10.7554/eLife.33752](#)
- Borg, F.G., & Laxaback, G. (2010). Entropy of balance—Some recent results. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 7(1), 1–11. doi:[10.1186/1743-0003-7-38](#)
- Burgess, N., Maguire, E.A., & O’Keefe, J. (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*, 35(4), 625–641. PubMed ID: [12194864](#) doi:[10.1016/S0896-6273\(02\)00830-9](#)
- Cerles, M., Guinet, E., & Rousset, S. (2015). Mutual interferences between automatic ongoing spatial-updating with self-motion and source recall. *Consciousness and Cognition*, 36, 103–112. PubMed ID: [26117154](#) doi:[10.1016/j.concog.2015.06.006](#)
- Chen, Y., Yu, Y., Niu, R., & Liu, Y. (2018). Selective effects of postural control on spatial vs. nonspatial working memory: A functional near-infrared spectral imaging study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 1–11. doi:[10.3389/fnhum.2018.00243](#)
- Chong, R.K.Y., Gibson, B., Horton, S., Lee, A., Mellinger, J., & Lee, K.-H. (2012). Spatial orientation during eyes closed versus open in the dark: Are they the same? *World Journal of Neuroscience*, 02(02), 126–132. doi:[10.4236/wjns.2012.22018](#)
- Chong, R.K.Y., Mills, B., Dailey, L., Lane, E., Smith, S., & Lee, K.-H. (2010). Specific interference between a cognitive task and sensory organization for stance balance control in healthy young adults: Visuospatial effects. *Neuropsychologia*, 48(9), 2709–2718. PubMed ID: [20478320](#) doi:[10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.018](#)
- Clark, I.A., Hotchin, V., Monk, A., Pizzamiglio, G., Liefgreen, A., & Maguire, E.A. (2019). Identifying the cognitive processes underpinning hippocampal-dependent tasks. *Journal of Experimental Psychology General*, 148(11). 1861–1881. doi:[10.1037/xge0000582](#)
- Dault, M.C., Yardley, L., & Frank, J.S. (2003). Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Cognitive Brain Research*, 16(3), 434– 440. PubMed ID: [12706223](#) doi:[10.1016/S0926-6410\(03\)00058-2](#)

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

- Dijkstra, K., Kaschak, M.P., & Zwaan, R.A. (2007). Body posture facilitates retrieval of autobiographical memories. *Cognition*, 102(1), 139–149. PubMed ID: [16472550](#) doi:[10.1016/j.cognition.2005.12.009](#)
- Donker, S.F., Roerdink, M., Greven, A.J., & Beek, P.J. (2007). Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, 181(1), 1–11. PubMed ID: [17401553](#) doi:[10.1007/s00221-007-0905-4](#)
- Fraizer, E.V., & Mitra, S. (2008). Methodological and interpretive issues in posturography dual-tasking in upright stance. *Gait and Posture*, 27(2), 271–279. PubMed ID: [17524648](#) doi:[10.1016/j.gaitpost.2007.04.002](#)
- Golomer, E., & Dupui, P. (2000). Spectral analysis of adult dancers' sways: Sex and interaction vision-proprioception. *International Journal of Neuroscience*, 105(1–4), 15–26. PubMed ID: [11069043](#) doi:[10.3109/00207450009003262](#)
- Gomez, A., Rousset, S., & Baciou, M. (2009). Egocentric-updating during navigation facilitates episodic memory retrieval. *Acta Psychologica*, 132(3), 221–227. PubMed ID: [19664742](#) doi:[10.1016/j.actpsy.2009.07.003](#)
- Hassabis, D., & Maguire, E.A. (2007). Deconstructing episodic memory with construction. *Trends in Cognitive Sciences*. 11(7), 299–306. PubMed ID: [17548229](#) doi:[10.1016/j.tics.2007.05.001](#)
- Horak, F.B. (2006). Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and Ageing*, 35(Suppl. 2), ii7–ii11. doi:[10.1093/ageing/af077](#)
- Horak, F.B., & Nashner, L.M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55(6), 1369–1381. PubMed ID: [3734861](#) doi:[10.1152/jn.1986.55.6.1369](#)
- Hufschmidt, A., Dichgans, J., Mauritz, K.H., & Hufschmidt, M. (1980). Some methods and parameters of body sway quantification and their neurological applications. *Arch Psychiatr Nervenkr*, 228(2), 135–150. doi:[10.1007/BF00365601](#)
- Huxhold, O., Li, S.-C., Schmiedek, F., & Lindenberger, U. (2006). Dual-tasking postural control: Aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention. *Brain Research Bulletin*, 69(3), 294–305. PubMed ID: [16564425](#) doi:[10.1016/j.brainresbull.2006.01.002](#)
- Kerr, B., Condon, S.M., & McDonald, L.A. (1985). Cognitive spatial processing and the regulation of posture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 617–622. PubMed ID: [2932533](#) doi:[10.1037/0096-1523.11.5.617](#)
- Laboissiere, R., Letievant, J.C., Ionescu, E., Barraud, P.A., Mazzuca, M., & Cian, C. (2015). Relationship between spectral characteristics of spontaneous postural sway and motion sickness susceptibility. *PLoS One*, 10(12), 1–15. doi:[10.1371/journal.pone.0144466](#)
- Lenth, R. (2019). emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.3.5. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Li, K.Z.H., Lindenberger, U., Freund, A.M., & Baltes, P.B. (2001). Walking while memorizing: Age-related differences in compensatory behavior. *Psychological Science*, 12(3), 230–237. PubMed ID: [11437306](#) doi:[10.1111/1467-9280.00341](#)
- Maguire, E.A., & Mullally, S.L. (2013). The hippocampus: A manifesto for change. *Journal of Experimental Psychology*, 142(4), 1180–1189. doi:[10.1037/a0033650](#)

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

- Maki, B.E., Holliday, P.J., & Fernie, G.R. (1990). Aging and postural control: A comparison of spontaneous- and induced-sway balance tests. *Journal of the American Geriatrics Society*, 38(1), 1–9. PubMed ID: [2295764](#) doi:[10.1111/j.1532-5415.1990.tb01588.x](#)
- Maylor, E., Allison, S., & Wing, A. (2001). Effects of spatial and nonspatial cognitive activity on postural stability. *British Journal of Psychology*, 92(2), 319–338. PubMed ID: [11802876](#) doi:[10.1348/000712601162211](#)
- Maylor, E.A., & Wing, A.M. (1996). Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 51B(3), P143–P154. doi:[10.1093/geronb/51B.3.P143](#)
- McGeehan, M.A., Woollacott, M.H., & Dalton, B.H. (2017). Vestibular control of standing balance is enhanced with increased cognitive load. *Experimental Brain Research*, 235(4), 1031–1040. PubMed ID: [28032141](#) doi:[10.1007/s00221-016-4858-3](#)
- Mcnevin, N.H., Shea, C.H., & Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological research*, 67(1), 22–29. PubMed ID: [12589447](#) doi:[10.1007/s00426-002-0093-6](#)
- Miles, L.K., Nind, L.K., & Macrae, C.N. (2010). Moving through time. *Psychological Science*, 21(2), 222–223. PubMed ID: [20424050](#) doi:[10.1177/0956797609359333](#)
- Mitra, S. (2003). Postural costs of suprapostural task load. *Human Movement Science*, 22(3), 253–270. PubMed ID: [12967757](#) doi:[10.1016/S0167-9457\(03\)00052-6](#)
- Mitra, S., & Fraizer, E.V. (2004). Effects of explicit sway-minimization on posturalsuprapostural dual-task performance. *Human Movement Science*, 23(1), 1–20. PubMed ID: [15201038](#) doi:[10.1016/j.humov.2004.03.003](#)
- Nashner, L.M. (1970). Sensory feedback in human posture control (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology)
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human-processing system. *Psychological Review*, 86(3), 214–255. doi:[10.1037/0033-295X.86.3.214](#)
- Oie, K.S., Kiemel, T., & Jeka, J.J. (2002). Multisensory fusion: Simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 164–176. PubMed ID: [12063140](#) doi:[10.1016/S0926-6410\(02\)00071-X](#)
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220–244. PubMed ID: [7972591](#) doi:[10.1037/0033-2909.116.2.220](#)
- Pellecchia, G.L. (2003). Postural sway increases with attentional demands of concurrent cognitive task. *Gait and Posture*, 18(1), 29–34. PubMed ID: [12855298](#) doi:[10.1016/S0966-6362\(02\)00138-8](#)
- Peterka, R.J. (2018). Sensory integration for human balance control. In B.L. Day and S.R. Lord (Eds), *Handbook of clinical neurology* (1st ed., Vol. 159). Amsterdam, Netherlands : Elsevier B.V. doi:[10.1016/b978-0-444-63916-5.00002-1](#)
- Plummer, P., Eskes, G., Wallace, S., Giuffrida, C., Fraas, M., Campbell, G., :: Skidmore, E.R. (2013). Cognitive-motor interference during functional mobility after stroke: State of the science and implications for future research. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(12), 2565–2574.e6. PubMed ID: [23973751](#) doi:[10.1016/j.apmr.2013.08.002](#)
- Polskaia, N., Richer, N., Dionne, E., & Lajoie, Y. (2015). Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention. *Gait and Posture*, 41(2), 454–458. PubMed ID: [25554460](#) doi:[10.1016/j.gaitpost.2014.11.009](#)

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

- Prieto, T.E., Myklebust, J.B., Hoffmann, R.G., Lovett, E.G., & Myklebust, B.M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(9), 956–966. PubMed ID: [9214811](#) doi:[10.1109/10.532130](#)
- Ramdani, S., Seigle, B., Lagarde, J., Bouchara, F., & Bernard, P.L. (2009). On the use of sample entropy to analyze human postural sway data. *Medical Engineering and Physics*, 31(8), 1023–1031. PubMed ID: [19608447](#) doi:[10.1016/j.medengphy.2009.06.004](#)
- Ramenzoni, V.C., Riley, M.A., Shockley, K., & Chiu, C.Y.P. (2007). Postural responses to specific types of working memory tasks. *Gait and Posture*, 25(3), 368–373. PubMed ID: [16806935](#) doi:[10.1016/j.gaitpost.2006.04.014](#)
- Riccio, G.E., & Stoffregen, T.A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological psychology*, 3(3), 195–240 doi:[10.1207/s15326969eco0303_2](#)
- Richman, J.S., Moorman, J.R., Gilmour, T.P., Piallat, B., Lieu, C.A., Venkiteswaran, K., Nakano, H. (2011). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *The American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 278(6), 2039–2049.
- Riley, M.A., Baker, A.A., & Schmit, J.M. (2003). Inverse relation between postural variability and difficulty of a concurrent short-term memory task. *Brain Research Bulletin*, 62(3), 191–195. PubMed ID: [14698352](#) doi:[10.1016/j.brainresbull.2003.09.012](#)
- Riley, M.A., Mitra, S., Saunders, N., Kiefer, A.W., & Wallot, S. (2012). The interplay between posture control and memory for spatial locations. *Experimental Brain Research*, 217(1), 43–52. PubMed ID: [22159560](#) doi:[10.1007/s00221-011-2970-y](#)
- Roerdink, M., De Haart, M., Daffertshofer, A., Donker, S.F., Geurts, A.C.H., & Beek, P.J. (2006). Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Experimental Brain Research*, 174(2), 256–269. PubMed ID: [16685508](#) doi:[10.1007/s00221-006-0441-7](#)
- Stins, J.F., Michielsen, M.E., Roerdink, M., & Beek, P.J. (2009). Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: Effects of expertise, vision and cognition. *Gait and Posture*, 30(1), 106–109. PubMed ID: [19411174](#) doi:[10.1016/j.gaitpost.2009.04.001](#)
- Stoffregen, T.A., Hove, P., Bardy, B.G., Riley, M., & Bonnet, C.T. (2007). Postural stabilization of perceptual but not cognitive performance. *Journal of Motor Behavior*, 39(2), 126–138. PubMed ID: [17428758](#) doi:[10.3200/JMBR.39.2.126-138](#)
- R Core Team. (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.rproject.org/>
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(1), 3–18. PubMed ID: [12669744](#) doi:[10.1037/0096-1523.29.1.3](#)
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. *Annual Review of Psychology*, 53(1), 1–25. doi:[10.1146/annurev.psych.53.100901.135114](#)
- Vander Velde, T., & Woollacott, M. (2008). Non-visual spatial tasks reveal increased interactions with stance postural control. *Brain Research*, 1208(1985), 95–102. doi:[10.1016/j.brainres.2008.03.005](#)

Long-Term Memory and Postural Control Interaction

- VanderVelde, T.J., Woollacott, M.H., & Shumway-Cook, A. (2005). Selective utilization of spatial working memory resources during stance posture. *NeuroReport*, 16(7), 773–777. PubMed ID: [15858423](#) doi:[10.1097/00001756-200505120-00023](#)
- Wickens, C.D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (ed.), *Attention and performance VIII* (vol. 8, p. 239–257). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: A review of an emerging area of research. *Gait Posture*, 16(1), 1–14. PubMed ID: [12127181](#) doi:[10.1016/S0966-6362\(01\)00156-4](#).
- Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C.H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 54(4), 1143–1154. doi:[10.1080/713756012](#)

**Annexe IV : TABLEAU DES REPORTS SUBJECTIFS
DE LA VECTION POUR L'EXPERIENCE 3 : LATENCE DE
LA VECTION, TEMPS PASSE EN VECTION ET NOMBRE
D'EPISODES DE VECTION POUR CHAQUE PARTICIPANT**

Participants	Latence (ms)	Nombre d'épisodes	Durée vection	% vection	temps en sec
1	10 085	3	43 572	24,07%	43,57
2	9 519	2	169 883	93,86%	169,88
3	11 097	7	107 999	59,67%	107,99
4	5 420	2	115 551	63,84%	115,55
5	13 623	4	151 990	83,97%	151,99
6	1 459	6	47 356	26,16%	47,36
7	9 834	2	153 655	84,89%	153,65
8	8 154	10	58 549	32,35%	58,55
9	5 753	13	80 970	44,73%	80,97
10	11 2315	2	46 932	25,93%	46,93
11	7 954	3	86 552	47,82%	86,55
12	9 809	3	80 190	44,30%	80,19
13	12 292	9	44 336	24,49%	44,34
14	7 152	11	83 405	46,08%	83,40
15	12 801	5	58 309	32,21%	58,31
16	10 610	4	152 686	84,36%	152,69
17	51 005	3	115 102	63,59%	115,10
18	5 602	7	43 791	24,19%	43,79
19	76 049	4	49 700	27,46%	49,70
20	7 553	6	48 359	26,72%	48,36
21	5 540	5	76 238	42,12%	76,24
22	12 939	9	142 858	78,93%	142,86
23	17 268	10	88 491	48,89%	88,49
24	10 788	3	115 004	63,54%	115,00
25	6 799	1	174 202	96,24%	174,20
26	14 737	5	79 339	43,83%	79,34
27	8 858	2	6 965	3,85%	6,96
28	7 917	4	160 031	88,41%	160,03
29	2 515	1	178 486	98,61%	178,49
30	12 173	4	10 481	5,79%	10,48
31	14 356	6	42 650	23,56%	42,65
32	6 290	4	131 462	72,63%	131,46
33	4 226	9	71 754	39,64%	71,75
34	14 214	1	166 787	92,15%	166,79
35	10 365	5	62 583	34,58%	62,58
Moyenne	15 738,81	5,19	93 945,59	51,90%	93,95
Ecart-type	22 876,62	3,11	46 266,98	25,56%	46,27

Annexe V : ARTICLE PUBLIE DANS PLOS ONE , EXPERIENCES 4 ET 5

RESEARCH ARTICLE

Postural responses to specific types of long-term memory during visually induced roll self-motion

Maëlle Tixier¹, Stéphane Rousset^{1*}, Pierre-Alain Barraud², Corinne Cian^{1,3}

1 Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS LPNC UMR 5105, Grenoble, France,

2 Université Grenoble Alpes, CNRS, CHU Grenoble-Alpes, Grenoble INP, TIMC-IMAG, Grenoble, France,

3 Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Brétigny sur Orge, France

* stephane.rousset@univ-grenoble-alpes.fr



Abstract

A large body of research has shown that visually induced self-motion (vection) and cognitive processing may interfere with each other. The aim of this study was to assess the interactive effects of a visual motion inducing vection (uniform motion in roll) versus a visual motion without vection (non-uniform motion) and long-term memory processing using the characteristics of standing posture (quiet stance). As the level of interference may be related to the nature of the cognitive tasks used, we examined the effect of visual motion on a memory task which requires a spatial process (episodic recollection) versus a memory task which does not require this process (semantic comparisons). Results confirm data of the literature showing that compensatory postural response in the same direction as background motion. Repeatedly watching visual uniform motion or increasing the cognitive load with a memory task did not decrease postural deviations. Finally, participants were differentially controlling their balance according to the memory task but this difference was significant only in the vection condition and in the plane of background motion. Increased sway regularity (decreased entropy) combined with decreased postural stability (increase variance) during vection for the episodic task would indicate an ineffective postural control. The different interference of episodic and semantic memory on posture during visual motion is consistent with the involvement of spatial processes during episodic memory recollection. It can be suggested that spatial disorientation due to visual roll motion preferentially interferes with spatial cognitive tasks, as spatial tasks can draw on resources expended to control posture.

OPEN ACCESS

Citation: Tixier M, Rousset S, Barraud P-A, Cian C (2021) Postural responses to specific types of long-term memory during visually induced roll self-motion. *PLoS ONE* 16(12): e0261266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261266>

Editor: Thomas A. Stoffregen, University of Minnesota, UNITED STATES

Received: July 9, 2021

Accepted: November 25, 2021

Published: December 17, 2021

Copyright: © 2021 Tixier et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All 3 data files are available from https://osf.io/fp677/view_only=6e0b41cb76af4756994c40bfedd89bc9.

Funding: This work was supported by the grant HUM1-1-818 from Ministère des Armées (France) awarded to CC. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

4 Introduction

Virtual reality systems are more and more frequently used in the field of learning and training but also in motor rehabilitation. One of the key points of the success of these systems is the experience of "presence" [1]. Presence can be thought of as the capacity of virtual reality to pro-duce the sensation of moving through the virtual environment in someone who remains stationary (vection, [2–4]). However, the visual simulation generates a sensory conflict (an optical flow specifying the movement of the self and vestibular stimuli

specifying the immobility of the body) and spatial disorientation which may modify the way users act in their virtual environment. Besides misperceptions of orientation, such motion of large visual fields has consequences for cognitive performances [5–9].

The overall aim of this study was to assess the interaction between the effect of a large visual field motion on spatial orientation and the nature of the processing involved in different long-term memory tasks. Long-term memory tasks are characterized by delayed retrieval after intervening events in contrast to short-term and working memory tasks that focus on information maintenance and subsequent recall [10, 11]. Here two forms of long term memory are considered: episodic and semantic memory. Episodic memory is the collection of past events that occurred at particular times and places. Episodic remembering is a process that allows to mentally reconstruct these events as they were previously experienced from retrieval cues.

Indeed, Tulving [12] likened the capacity of remembering specific episodes to “mental time travel,” as if the individual is able to re-experience individual events. Semantic memory implies retrieval related to general knowledge about the world. Whereas the effect of vection on working memory has been studied [5], less is known about its effect on recollection of episodic and semantic memories. However, one study on autobiographical memory (memory about a person’s own life, encompassing both semantic and episodic components) showed that the direction of visual motion changes the emotional valence of recollected memories [7]. It has been shown that the change in participant’s mood with vection direction underlies the modulation of the valence of recollected memories [7, 8]. Beside its effect on mood, vection may interact with cognitive tasks because spatial disorientation due to the motion of the visual scene reduces the information processing capacity needed to perform the cognitive task [13]. However, spatial disorientation is thought to mainly disrupt spatial cognitive function [14]. Thus, the level of interference may also be related to the nature of the cognitive tasks used. Accordingly, different effects of vection on episodic and semantic memory can be hypothesised, since episodic memory engages a spatial processing during recollection [15, 16] whereas semantic memory implies retrieval independent of any specific spatial context.

Imposing an attentional task during vection has also been shown to decrease the strength of vection [17]. However, the tasks performed in this study [17] needed the use of vision which may produce interference because of visual

resources competition. Moreover, the weakening of vection may also be related to participants' attention to self-motion. Indeed, it has been suggested that stronger vection can result from decreasing the amount of attention allocated to the motion stimulus [18]. Thus, it is difficult to pinpoint whether imposing a cognitive task during visual motion impairs cognitive performance, vection strength or both since a decrease or an increase in participants' attention to the motion varies across studies (i.e. reporting vection during the cognitive task or not [5, 17]). Thus in the current study, postural sway as an objective indicator of vection [19] was used to assess the interaction between visually induced self-motion and long-term memory processing. As a response to visual motion, the observers have to update their body sway to changes in the environment [20]. Motion in a large visual field inducing vection has been shown to produce a compensatory postural response in standing observers in the same direction as background motion [21–24]. The amplitude of postural movements has also been reported to increase during simulated motion as compared to conditions with a stationary scene [5, 25]. It has been suggested that vection and body sway are correlated [19, 26, 27]. However, visual motion in itself may affect postural control [27–30]. Using a constant visual-motion stimulus that yields object (no vection) and self-motion perception in spontaneous alternation, it has been shown that postural sway is significantly larger during visual motion without vection (object motion) than during no visual motion [23]. Postural sway for object and self-motion perception were both in the same direction as background motion, but postural instability further increased during vection perception. Thus, visual motion affects postural control mechanisms regardless of vection but the increment of postural sway during self-motion perception suggests that vection itself affects postural stability [23]. Finally, it has been suggested that visually induced postural responses might be mediated by different mechanisms such as a long latency visuo-postural mechanism which is enhanced by vection and related to conscious self-motion perception [26]. However, when performing a cognitive task during visual motion, it is not easy to use such a procedure which asks observers to consciously evaluate self-motion. The current study investigated the effect of visual motion on long-term memory distinguishing between postural activity that corresponds to visual motion stimulation without self-motion perception (non-uniform motion) versus that which corresponds to vection per se (uniform motion).

The use of postural responses as an indicator of vection requires performing a cognitive task during standing posture (dual task). Whereas only a certain

amount of postural motor control is needed when sitting [31], standing requires a higher postural control demand. A large body of research has shown that postural balance and cognitive tasks may interfere with each other (for a review see [32]). Performing a concurrent cognitive task could promote the adoption of an automatic postural control caused by withdrawing attention from the postural task [33, 34] but it could also induce an ineffective postural control (for a review, see [35]). The level of interference may be related to the nature of the cognitive task used. It has been suggested that spatial processing is primarily what is shared between cognitive tasks and postural control [31, 36–38]. Since stance balance has spatial components, cognitive tasks that have spatial processing requirements might create greater interference. Comparing an episodic (spatial processing) and semantic memory task (no spatial processing), differences in postural control have been shown that may result from the type of processes involved in the long-term memory task [39]. Improvement in balance during quiet standing has also been observed for spatial Working Memory (WM) tasks compared with nonspatial WM tasks [38, 40]. When the postural constraints were increased, the reverse was observed [41, 42].

Visual motion inducing vection challenges balance as postural constraints do [43, 44]. However, in a previous vection study, no difference was observed between spatial and nonspatial WM tasks in terms of body orientation and postural stability [5]. The effect of vection on memory was assessed during encoding. However, postural sway patterns depend on the phase of the memory task (either encoding, maintenance, or retrieval phases [37, 38]). Less is known about the effect of visual motion on postural control when performing long-term memory retrieval. Accordingly, our main purpose was to examine the interactive effects of a moving visual field inducing vection (uniform motion) versus visual motion stimulation without self-motion perception (non-uniform motion), with a memory task which requires a spatial process (episodic recollection) versus a memory task which does not require a spatial process (semantic comparisons) during quiet stance. In order to avoid interference because of visual resources competition, cues for retrieval were presented auditorily. However, the tasks performed in this study required people to provide vocal responses during postural sway measurements. It has been shown that the motor requirements of the cognitive task (i.e. muscle activity associated with vocalization) could induce changes in postural sway [45]. Thus, we first tested in a preliminary experiment the effect of verbal repetition on posture when participants confronted a moving visual field.

Method

This study was performed in accordance with the ethical standards specified by the 1964 Declaration of Helsinki and approved by the institutional ethics committee of the Université Grenoble Alpes (IRB00010290-2018-04-03-42). All participants had normal or corrected-to normal vision and audition, they reported no history of balance or neuromuscular disorder, and they reported not taking drugs that may affect cognitive functions or balance. They gave their informed written consent prior to their participation and received financial compensation. This study was conducted under a strict compliance with the health protocol due to COVID-19.

Postural control setup and visual stimuli

Static posturography was measured with a force-sensitive platform equipped with four strain gauges linked to a computer [39]. This setup was used to record the displacements of the center of feet pressure (CoP) in the horizontal plane with a sampling frequency of 100 Hz. With regard to the position of the CoP, the mean imprecision for a 70-kg load applied on the center of the platform was <0.1 mm. The antero-posterior (AP) and medio-lateral (ML) axes were defined as being y and x axes respectively. Barefoot participants were asked to stand relaxed on the force platform with their feet abducted at 30° and heels separated by 2 cm, their arms suspended naturally at their sides. They were asked to look straight ahead at a central white cross on a TV screen.

Participants were tested in a completely darkened room. They were exposed to visual stimuli on a TV screen (Samsung 4K UHD 163cm, 3840x2160 pixels) with a monitor refresh rate of 60Hz. To eliminate unwanted horizontal or vertical cues, the edges of the screen were covered using a black cardboard cover, leaving a circular viewing area with a diameter of 72cm.

The visual stimuli consisted of randomly spaced dots of different sizes and colors, covering around 40% of the area of a black background. A central white cross provided a fixation point. The screen was height-adjustable to ensure that the participant's gaze was aligned with the center of the circular visual field. The distance between the screen and the participant's nasion was 45 cm with the visual field subtending a visual angle of 77 deg. The stimuli comprised three movies: a static pattern of dots, a uniform and a non-uniform moving pattern of dots. In the uniform motion condition, dots rotated in a circular formation (roll plane) in a clockwise (CW) direction at 30deg/sec. In this uniform condition, vection should be generated. In the non-uniform condition, half of the dots

turned rightward and the other half leftward. In order to prevent perception of bistable vection alternatively to the right and the left, the linear velocity of each dot in the uniform condition was randomly reassigned to another dot of this non-uniform condition. Thus, the same number of dots moved quickly and slowly but they were distributed randomly among the radius of the circle. This movie was constructed to be equivalent to the uniform one but so as to not induce vection.

Preliminary experiment: The effect of visual roll motion and verbal responses on standing posture

Participants. The data were obtained from 24 of 26 volunteers (11 women and 13 men; mean \pm SD: age = 25.5 \pm 4.9), 2 participants did not choose to participate.

Additional tasks. The additional tasks were implemented in E-Prime 2.0 Professional (PsychologySoftwareTools, Inc., Pittsburgh, PA). Thirty-six common French nouns (mean textual frequency = 35,1) were used as auditory stimuli, see [S1 File](#). In the repetition task, participants had to repeat the word they heard. They had up to three seconds after the end of the auditory stimulus to verbally repeat the word. In the no-repetition task, they also heard a pre-recorded word but they did not have to repeat it. Participants wore headphones for the presentation of the auditory stimuli.

Procedure. Before the experiment began, participants saw the three visual conditions for 30 seconds each to familiarize themselves with the stimuli. The experiment was divided into six blocks, two for each visual condition (static, uniform and non-uniform). Each block lasted 138 seconds (Fig 1A). At the beginning of each block, participants saw a static image of the dots for ten seconds (i.e., postural baseline measurement). Then, the video corresponding to the visual condition (static, uniform or non-uniform) was displayed for 128 seconds during which the repetition and no-repetition tasks were performed in a counterbalanced order. At the beginning of the video, the auditory repetition (or no-repetition) instructions were delivered through headphone (one sec). The first task was initiated 10 seconds after visual stimulus onset to let the time for the vection sensation if any to appear. The second task (no-repetition or repetition) was performed 10 seconds after the end of the first task. During this 10 seconds rest period, the video continued to be displayed and auditory instructions were given.

Each supplementary task lasted 54 seconds and consisted of six auditory stimuli. Participants heard the first word, had three seconds to repeat it (or

not) followed by five seconds of rest before the second auditory stimulus. Participants had to look at the fixation cross in front of him during the entire block. The blocks were separated by a two-minute rest period where participants had to get off the platform. For each participant, each word was heard twice but in different blocks and visual conditions, once in the repetition task and once in the no-repetition task. The order of the visual conditions was counterbalanced among participants.

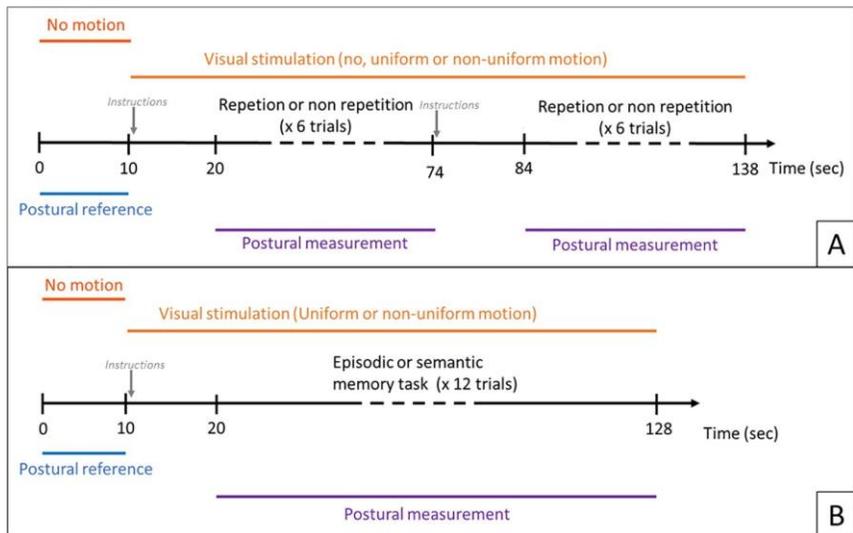


Fig 1. Block procedure. Time sequence of tasks during one block for the preliminary experiment (A) and for the main experiment (B).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261266.g001>

Main experiment: Effect of visual motion on long-term memory

Participants. The data were obtained from 24 volunteers (16 women and 6 men; mean \pm SD: age = 20.7 \pm 1.03). None of them participated in the preliminary experiment.

Long-term memory tasks. Both tasks have been adapted from the Cerles et al. [46] and Tixier et al. [39] studies. These tasks allowed us to compare, in the same setting, episodic and semantic memory while maintaining similar difficulty, similar mental imagery demand, and similar response options. During these semantic and episodic tasks, participants were wearing headphones for presentation of auditory stimuli displayed by E-Prime 2.0.

For the semantic memory task, 96 words referred to objects, animals and plants were paired, see [S1 File](#). The participants heard two words and then chose on which characteristic they are the most similar. They had choice among three features: the flexibility (e.g., the two words referred to something rigid), the shape (e.g., the two words referred to something circular) or the weight (i.e., the two words referred to things with approximately the same weight). They had three seconds maximum after the prerecorded word ended to give their response aloud (i.e., flex, shape, or weight).

In the episodic memory task, three lists of seventeen common words were used, see [S1 File](#). During the encoding phase, the first list was read from a paper, the second was copied, and the third was presented on a laptop with words appearing one by one in the center of the screen. This encoding phase was presented as a short-term memory task where participants must recall as many words as possible in 1 min directly after the 2 min presentation. To ensure a good learning level, each list was presented three times and cued recall (object category as cues) was proposed for omissions occurring during each free recall. To ensure the validity of the cues in the cued recall occurring during the learning phase, each list contained only one word belonging to one of seventeen categories (e.g., bird, fruit, mammal, sport. . .). In this encoding phase, no visual motion of the field was presented and participants were unaware of the forthcoming source recall which constitute the task of interest of this study.

The unexpected episodic source recall took place in the second phase of the experiment while the participant confronted either a non-uniform pattern or a uniform pattern of moving dots (see procedure). Participants heard a word which belongs to one of the three lists previously learned and had to decide in which list the word was. They had three seconds maximum after the prerecorded word ended to determine the episodic source by reporting it aloud (i.e., read, copy or screen).

The words used in the semantic and episodic tasks were of equivalent frequency (standardized lexicon.org database), both in terms of classical textual frequency and frequency of occurrence in the films (episodic freq text = 30.43, freq film = 31.82; semantic freq text = 35.7 freq film = 21.99, all $p > 0.38$).

Procedure. The participants first completed the learning phase for the episodic task that

lasted approximately forty minutes. The dual tasks were then performed in a different room. In this second phase, participants had to perform episodic and semantic memory tasks either in front of a non-uniform pattern or a uniform pattern of moving dots.

The dual-tasking phase was organized in eight blocks lasting approximately 128 seconds. (i.e., four with semantic and four with episodic memory task). Each block corresponded to twelve trials of the episodic task or twelve trials of the semantic task (Fig 1B). The order of the tasks was counterbalanced. Each block began with the static image of the dots for ten seconds without cognitive tasks (i.e., postural baseline measurement). Participants had to look at the fixation cross in front of them during the entire block. Then, the dots began to move either in a uniform or non-uniform manner and participants heard the memory task instruction reminder during the first second. The memory task began 10 seconds after the visual stimulus onset to let the time for the vection sensation if any to appear. Then the participant completed 12 trials of the same memory task (i.e., semantic or episodic). A trial began by the auditory stimulus, then participants had three seconds maximum to verbally respond followed by a two-second rest period before the next trial. Vision conditions (i.e., uniform and non-uniform) changed between blocks. After two blocks, participants had a break for two minutes to walk or sit far away from the screen.

The order of visual conditions was interleaved and counterbalanced across participants. Half of the memory tasks trials were performed during uniform condition and the other half during non-uniform condition. The condition associated with each memory stimulus was counterbalanced across participants. This testing phase lasted forty minutes. It was preceded and followed by 6 trials of a repetition task (see Preliminary Experiment) in the uniform and non-uniform visual condition. These control measures allowed a manipulation check of vection strength.

Postural parameters

For assessment of postural sway, CoP time series collected in the initial stationary period (baseline, 0-10s) of each block and during each visual condition with additional task phase (i.e. dual task phase: for the preliminary experiment repetition and no-repetition phase of 54 sec, for main experiment semantic and episodic phases of 108 sec) were included. CoP time series were first filtered using a second order low-pass Butterworth filter with a cutoff frequency of 5 Hz. According to the literature on the effect of visual motion inducing vection (see introduction section), three parameters were chosen: postural orientation (deviation), postural stability (variance) and amount of attention invested in postural control (regularity of CoP time series). For each block, visual condition and participant, the deviation in the medio-lateral (ML) and antero-posterior (AP) directions was evaluated as the shift of the COP during the dual task phase relative to the baseline (ten first seconds in

presence of a static visual field at the beginning of each block). Positive values denote a postural deviation on the right and forward for the ML and AP axes respectively. Variability of ML and AP trajectories was evaluated to quantify the amount of postural sway (variance [47]). To give insights into the regularity of CoP trajectories, the sample entropy in the AP and ML direction was determined using the method developed by Lee for Matlab [28]. The calculation parameters were set to typical values: $m = 3$ and $r = 0.3$ [48]. Lower sample entropy values imply more regular and less complex CoP time series. Conversely, higher sample entropy values imply more complex and random time series. All computations were performed with Matlab software (R2019b, update 6).

Statistical analysis

All data were assessed for normality using the Shapiro-Wilk test ($p > 0.05$). A repeated measures analysis of variance (ANOVA) was applied on the percentage of correct responses for the memory tasks (responses higher than three seconds were considered as incorrect) with two within-subject factors, visual condition (non-uniform and uniform movement) and memory task (episodic, semantic). A post-hoc analysis was conducted with a Bonferroni correction applied as necessary. Because the data distributions for the postural parameters were not Gaussian (Shapiro-Wilk test, $p < 0.05$), Friedman test design was applied. For pairwise comparisons, the Wilcoxon signed-rank test with appropriate Bonferroni correction was applied as necessary. All statistical analyses were performed using Statistica software (v13.3, 1984–2017, TIBCO software INC), with the significance level set at $p < 0.05$.

Results

Preliminary experiment

Mean deviation (see Fig 2): For the ML(x) direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(5) = 49.52$, $p < 0.000001$). Post-hoc comparisons (critical $p < 0.0055$ after Bonferroni correction) showed a tilt of posture toward the right during uniform motion (mean = 6.32 mm SE = 1.00) compared to non-uniform motion (mean = -0.46 mm, SE = 0.50) and static conditions (mean = 0.32 mm; SE = 0.64) (for all comparisons, $Z > 3.6$, $p < 0.0003$). Non-uniform motion and static conditions were not significantly different (all comparisons, $Z < 0.14$, $p > 0.88$). Whatever the visual condition, there were no differences between the additional tasks (all comparisons, $Z < 1.23$, $p > 0.22$). The same pattern of results was observed for the AP (y) direction ($\chi^2(5) = 39.55$, $p < 0.000001$). In the uniform condition, the observer's body inclined toward the front (mean uniform = 4.90 mm; SE = 1.55) compared to non-

uniform (mean = 0.67mm, SE = 0.99) and static (mean = -1.92mm; SE = 1.05) conditions (all comparisons, $Z > 3.2$, $p < 0.0013$). The direction of postural responses was not different between non-uniform and static conditions (all comparisons, $Z < 2.31$, $p > 0.02$). There were no differences between the additional tasks (all comparisons, $Z < 2.14$, $p > 0.03$).

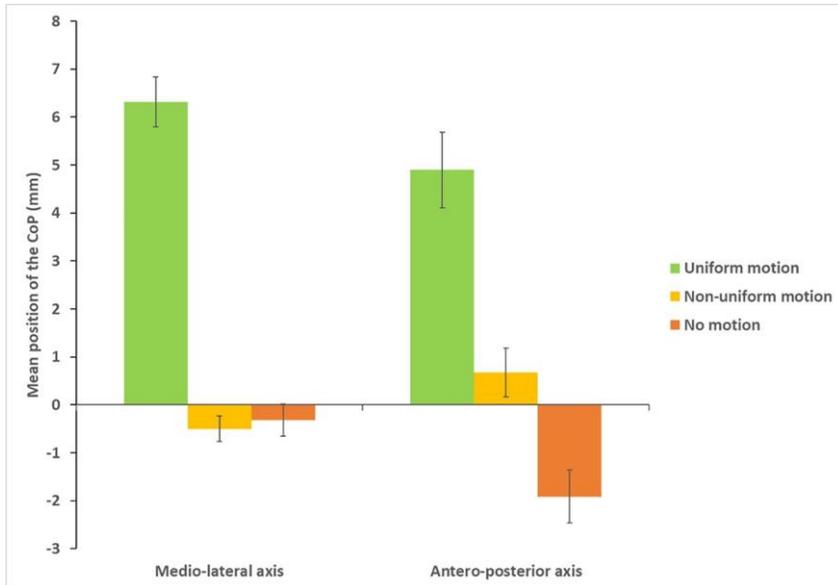


Fig 2. Mean position of the CoP on the medio-lateral and antero-posterior axis during the three visual stimulations for no motion, uniform and non-uniform motion. Positive values denote a postural deviation on the right and forward for the ML and AP axes respectively. Bars represent the standard error.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261266.g002>

Variance: For the ML direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(5) = 54.07$, $p < 0.000001$). Post-hoc comparisons showed that the static condition (mean = 7.68 mm, SE = 1.09) generated less variance than uniform (mean = 25.74 mm, SE = 2.1) and non-uniform (mean = 13.2 mm, SE = 1.87) motions (all comparisons, $Z > 3.28$, $p < 0.001$). Uniform and non-uniform motions were not significantly different (all comparisons, $Z < 1.88$, $p > 0.06$). There were no differences between the additional tasks (all comparisons, $Z < 1.62$, $p > 0.10$). For the AP direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(5) = 14.52$, $p = 0.012$). However, there were no differences between the visual conditions (all

comparisons, $Z < 1.97, p > 0.05$) nor between the additional tasks (all comparisons, $Z < 1.71, p > 0.08$).

Sample entropy: For the ML direction the Friedman test was significant ($\chi^2(5) = 25.02, p = 0.00014$). Post-hoc comparisons (critical $p < 0.0055$ after Bonferroni correction) showed no differences between the visual conditions (all comparisons, $Z < 2.62, p > 0.008$) nor between the additional tasks (all comparisons, $Z < 2.60, p > 0.009$). For the AP direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(5) = 28.52, P = 0.00003$). However, after Bonferroni correction, no differences between the visual conditions nor between the additional tasks were observed (all comparisons, $Z < 2.65, p > 0.008$).

Main experiment

Four participants were excluded from analyses because of technical problems resulting in 20 observers.

Effect of visual motion on long-term memory. Performances were higher than the chance level (i.e., three possible responses in each task, 33%) for both episodic and semantic memory task ($ps < 0.001$). No main effect of the memory task was found, $F(1, 19) = 0.03, p = 0.87, \eta_p^2 = 0.001$. Episodic and semantic tasks were performed equally (mean episodic = 73.75%, SE = 2.68, mean semantic = 73.27%, SE = 2.93). No main effect of vision condition was observed, $F(1, 19) = 2.27, p = 0.15, \eta_p^2 = 0.107$. Non-uniform and uniform motions generated the same number of correct answers (mean uniform = 73.75%, SE = 2.65, mean non-uniform = 74.69%, SE = 2.80). There was no interaction between these two factors, $F(1, 19) = 0.10, p = 0.75, \eta_p^2 = 0.107$.

Effect of visual motion on posture during long-term memory tasks.

Mean deviation: For the ML(x) direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(3) = 21.06, p = 0.0001$). Post-hoc comparisons (critical $p = 0.0125$ after Bonferroni correction) showed a tilt of posture toward the right during uniform motion (mean = 5.54 mm, SE = 1.72) compared to non-uniform motion (mean = -0.93 mm, SE = 0.63) (all comparisons, $Z > 3.47, p < 0.00052$). Whatever the visual condition, there were no differences between the memory tasks (all comparisons, $Z < 1.00, P > 0.31$). A supplementary analysis was conducted in order to evaluate any postural change during the experimental timeline (before, during and after dual tasking). We compared, for uniform and non-uniform motions, the mean deviation observed in the simple postural tasks that preceded and followed the dual task, to the mean deviation calcu-

lated over the dual-tasking blocks (semantic and episodic). The Friedman test was significant ($\chi^2(5) = 37.83, p < 0.000001$). Post-hoc comparisons (critical $p = 0.005$ after Bonferroni correction) showed significant differences between uniform and non-uniform motion conditions (all comparisons, $Z > 3.91, p < 0.0035$) but no differences between the three phases of the experiment (before, during and after dual-tasking; all comparisons, $Z < 2.42, p > 0.015$). For the AP direction, no differences were observed ($\chi^2(3) = 2.28, p = 0.52$).

Variance (Fig 3A): For the ML direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(3) = 11.7, p < 0.0085$). For the episodic task, the variance on the x axis is greater during the uniform motion (vection) than during the non-uniform motion ($Z = 3.47, p = 0.00052$). For the AP direction, no differences were observed ($\chi^2(3) = 2.46, p = 0.48$). **Sample entropy (Fig 3B):** For the ML direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(3) = 8.34, p < 0.039$). For the episodic task, sway fluctuations were more regular (as indexed by a decrease in sample entropy) during uniform than non-uniform motion ($Z = 2.54, p = 0.011$). For the AP direction, the Friedman test was significant ($\chi^2(3) = 12.3, p = 0.0064$). Post-hoc comparisons showed no differences between the memory conditions (all comparisons, $Z < 1.08, p > 0.28$) and marginally significant differences between uniform and non-uniform motion conditions ($p < 0.0125$ after Bonferroni correction, all comparisons, $Z < 2.38, p > 0.017$). Sway fluctuations were more regular in the non-uniform visual condition.

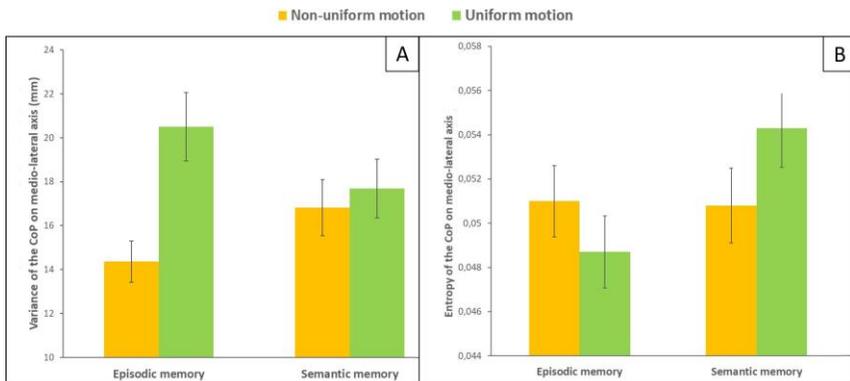


Fig 3. Effect of visual motion on posture during long-term memory tasks.

(A) Variance of the CoP on medio-lateral axis during episodic and semantic memory task for both visual stimulation uniform and non-uniform motions. Bars represent the standard error. (B) Entropy on medio-lateral axis during episodic and semantic memory task for both visual stimulation uniform and non-uniform motions. Bars represent the standard error.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261266.g003>

Discussion

Our study addressed the influence of roll vection (illusory self-motion) and long-term memory on postural control. To disentangle the postural effect of illusory self-motion from the effect of motion in the visual field, we opposed two visual moving stimuli with only one generating vection. In order to highlight a specific postural response to the spatial task during vection, we compared two dual task situations, an episodic recollection task that requires a spatial process and a semantic comparison task.

Effect of visual motion on standing posture

In the absence of a concurrent mental task, results showed that postural control mechanisms were affected by visual motion. As already shown in the literature, we observed compensatory postural response in the same direction as background motion. Postural sway also increased compared to no motion, suggesting instability. Sway variability differences occurred in the ML direction but not in the AP direction. Thus, differences between no motion and visual motion occurred in the plane of visual stimulation (i.e., the fronto parallel plane). Although sway variability increased during uniform motion compared to non-uniform motion, this difference was not significant. This result is not consistent with that observed by Tanahashi et al. [23] showing that postural instability further increased during vection than during visual motion without self-motion perception.

Imposing an attentional task during visual stimulation inducing vection has been shown to weaken the strength of self-motion perception [17]. In the preliminary experiment, the repetition task would require more attention than the no-repetition task. It has been proposed a direct relation between CoP regularity and the amount of attention invested in postural control [33, 49], a higher entropy indicating that postural balance requires less attention [50]. As the attention must be directed toward the concurrent task, postural regulations might thus be controlled at the level of automatic processes [33, 51–53]. However, no differences were observed between the repetition and no-repetition tasks, suggesting that both conditions induced the same amount of attention. Moreover, the repetition task induced no modulation of the direction of compensatory postural responses or variability. Thus, it cannot be concluded that attention engaged in the repetition task modulates the strength of self-motion perception. Finally, it has been suggested that the motor requirements of the cognitive task could influence

postural sway. When participants are instructed to provide vocal responses, muscle activity associated with vocalization may contribute to changes in postural control [45]. In the absence of significant difference between the repetition and no repetition task, this motor influence failed to be observed in this study.

Postural responses to specific types of long-term memory

Memory performance was similar for visual motion stimulation without self-motion perception (non-uniform motion) and that which corresponds to vection (uniform motion). However, these cognitive tasks had a different impact on postural performance. Participants were differentially controlling their balance according to the memory task but this difference was significant only in the uniform condition. There was an increase in variance for the episodic task. Sway fluctuations were also more regular when performing the episodic task. These differences were observed in the ML direction, i.e. in the same plane as background motion. This increased sway regularity (decreased entropy) combined with decreased postural stability (increase variance) during visual stimulation inducing vection for the episodic task would indicate an ineffective postural control [33, 34]. For some authors, two tasks will interfere with each other only if they require common limited resources [54, 55]. It can be suggested that the different interference of episodic and semantic memory on posture during vection reflects the effects of spatial and nonspatial cognitive content on postural stability. Indeed, both memory tasks have a mental imagery component with no need of a perceptual contact with the environment, but they differ with respect to the spatial process involved. A scene with a spatial context has to be generated in an episodic task. In contrast, a semantic task implies an object evocation outside of any spatial context.

When postural constraints were increased, it was shown that, compared to a non-spatial WM task, a WM task that induces spatial processing increases postural sway [41, 42]. Considering that visual motion challenges balance, the interference between spatial memory task and postural control is in line with these studies. However, the effect observed in the present study was specific to uniform motion that can induce vection.

This difference between spatial and nonspatial tasks during visual uniform motion inducing vection was not observed by Ehrenfield et al. [5] in a WM study. On one hand, these authors used visual stimulation during the encoding phase whereas here retrieval was concerned. On the other hand, visual

stimulation was also different. They used linear vection (horizontal motion) whereas here vection was induced by roll motion. These two visual motions differed in terms of conflicting sensory information. Indeed, circular vection around the earth-horizontal axis (roll motion) induces a visual-otolith conflict, i.e. the absence of changes in otolithic stimulation is incompatible with body rotation perception in upright observers (for a review see [56]). The perception of rolling motion would therefore require the observer to ignore the graviceptive inputs indicating that the head is stationary (visual-otolith conflict, [57]), which is not the case for linear vection. Visual roll motion can induce a higher level of spatial disorientation, causing inappropriate postural adjustments that can interact with cognition [13].

As proposed above, the interaction between memory and posture may be related to spatial disorientation caused by a visuo-otolith conflict specific to the uniform roll motion. The effect of visual motion may be the result of the cognitive load imposed by the sensory conflict. As the conflict is of a spatial nature, it would preferentially interfere with spatial cognitive tasks. In this experiment, we did not choose to ask for a conscious report of the sensation of vection in order to maintain the feasibility of the memory task and to avoid disrupting the processes by this additional introspection. Therefore, we do not know whether the effect is due to the periods of time when subjects are aware of their vection state. Indeed, visual roll motion stimulation biases the perceived direction of verticality and thus postural responses, independently of the perceptual state [57], even though the absence of vection induces postural deviation and variability to a lesser extent [21]. Thus, the effect of uniform vs. no uniform motion may be related to differences in the perception of the direction of verticality instead of the presence or absence of vection. Whatever the origin of the disorientation, the effect of uniform motion observed in the episodic condition is a strong indication of process sharing, specific to this long-term memory.

Conclusion

This study highlighted a differential impact of concurrent episodic and semantic tasks on postural responses to visual roll motion. The modifications of the postural control can elucidate the common processes involved in illusory self-motion and episodic memory. Changes have been observed for a specific continuous visual motion that generates a sensory conflict. Further experiments are needed to investigate the influence of spatial disorientation

on cognitive processing particularly when virtual reality induces changes in the direction of visual motion.

Acknowledgments

The authors thank Rafael Laboissiere for his help in constructing the video stimuli and Christopher Moulin for English editing of the manuscript.

Author Contributions

Conceptualization: Maëlle Tixier, Stéphane Rousset, Corinne Cian.

Data curation: Maëlle Tixier, Pierre-Alain Barraud, Corinne Cian.

Formal analysis: Maëlle Tixier, Stéphane Rousset, Pierre-Alain Barraud, Corinne Cian.

Funding acquisition: Corinne Cian.

Investigation: Maëlle Tixier, Corinne Cian.

Methodology: Maëlle Tixier, Stéphane Rousset, Pierre-Alain Barraud, Corinne Cian.

Project administration: Maëlle Tixier, Corinne Cian.

Resources: Pierre-Alain Barraud.

Software: Stéphane Rousset, Pierre-Alain Barraud.

Supervision: Maëlle Tixier, Stéphane Rousset, Corinne Cian. **Validation:** Maëlle Tixier, Corinne Cian.

Visualization: Maëlle Tixier, Corinne Cian.

Writing – original draft: Maëlle Tixier, Stéphane Rousset, Corinne Cian.

Writing – review & editing: Maëlle Tixier, Stéphane Rousset, Corinne Cian.

References

1. Chertoff DB, Schatz SL. Beyond Presence: How Holistic Experience Drives Training and Education. In: Hale K, Stanney K, editors. Handbook of Virtual Environments. CRC Press. 2014.
2. Dichgans J, Brandt T. Visual-vestibular interaction: effect on self-motion and postural control. In: Held R, Leibowitz HW, Teuber HL, editors. Perception. Handbook of Sensory Physiology. Berlin: Springer; 1978. pp. 755–804.
3. Howard IP. Human visual orientation. Chichester: Wiley; 1982.
4. Howard IP. The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In: Boff K, Kaufman L, Thomas J, editors. Handbook of human perception and performance. New York: Wiley; 1986. p. 1–61.

5. Ehrenfried T, Guerraz M, Thilo K V., Yardley L, Gresty MA Posture and mental task performance when viewing a moving visual field. *Cogn Brain Res.* 2003; 17(1): 140–53. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(03\)00088-0](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(03)00088-0) PMID: 12763200
6. Laboissière R, Barraud PA, Cian C. Real and visually-induced body inclination differently affect the perception of object stability. *PLoS One.* 2017; 12(10): 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186431> PMID: 29036180
7. Seno T, Kawabe T, Ito H, Sunaga S. Vection modulates emotional valence of autobiographical episodic memories. *Cognition [Internet].* 2013; 126(1): 115–20. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.08.009> PMID: 23063264
8. Seno T, Taya S, Yamada Y, Ihaya K, Ito H, Sunaga S. Vection (self-motion perception) alters cognitive states, cognition of time, mental number line and personality. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society.* 2012; vol 34, iss 34.
9. Vajima A, Seno T. Modulation of recognition memory for emotional images by vertical vection. *Front Psychol.* 2016 Feb 1;7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00007> PMID: 26834680
10. Baddeley A. Working memory. *Curr Biol.* 2010; 20(4): 136–140.
11. Cowan N. (2008). What are the differences between long-term, short-term, and working memory? *Prog Brain Res.* 2008; 169(07): 323–338.
12. Tulving E. Episodic memory: from mind to brain. *Annu Rev Psychol.* 2002; 53:1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135114> PMID: 11752477
13. Gresty MA, Golding JF, Le H, Nightingale K. Cognitive impairment by spatial disorientation. *Aviat Space Environ Med.* 2008; 79(2): 105–11. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2143.2008> PMID: 18309907
14. Gresty MA, Waters S, Bray A, Bunday K, Golding JF. Impairment of spatial cognitive function with preservation of verbal performance during spatial disorientation. *Curr Biol.* 2003 Oct 28; 13(21). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2003.10.013> PMID: 14588257
15. Hassabis D, Kumaran D, Vann SD, Maguire EA. Patients with hippocampal amnesia cannot imagine new experiences. *Proc Natl Acad Sci [Internet].* 2007; 104(5):1726–31. Available from: <http://www.pnas.org/cgi/doi/https://doi.org/10.1073/pnas.0610561104> PMID: 17229836

16. Hassabis D, Maguire EA. Deconstructing episodic memory with construction. *Trends Cogn Sci*. 2007; 11(7): 299–306.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.05.001> PMID: 17548229
17. Seno T, Ito H, Sunaga S. Attentional load inhibits vection. *Atten Percept Psychophys*. 2011; 73 (5):1467–76. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0129-3> PMID: 21491162
18. Kitazaki M, Sato T. Attentional modulation of self-motion perception. *Perception*. 2003; 32(4): 475–84. <https://doi.org/10.1068/p5037> PMID: 12785485
19. Palmisano S, Allison RS, Schira MM, Barry RJ. Future challenges for vection research: Definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Front Psychol*. 2015; Feb 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00193>
20. Assländer L, Peterka RJ. Sensory reweighting dynamics in human postural control. *J Neurophysiol*. 2014; 111:1852–64.
<https://doi.org/10.1152/jn.00669.2013> PMID: 24501263
21. Thurrell A, Bertholon P, Bronstein AM. Reorientation of a visually evoked postural response during passive whole body rotation. *Exp Brain Res*. 2000; 133(2): 229–32. <https://doi.org/10.1007/s002210000373> PMID: 10968223
22. Thurrell AEI, Bronstein AM. Vection increases the magnitude and accuracy of visually evoked postural responses. *Exp Brain Res*. 2002; 147(4): 558–60. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1296-1> PMID: 12444489
23. Tanahashi S, Ujike H, Kozawa R, Ukai K. Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization. *J Neuroeng Rehabil*. 2007; 4: 1–11. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-1> PMID: 17244363
24. Fushiki H, Kobayashi K, Asai M, Watanabe Y. Influence of visually induced self-motion on postural stability. *Acta Otolaryngol*. 2005; 125(1): 60–4. <https://doi.org/10.1080/00016480410015794> PMID: 15799576
25. Luo H, Wang X, Fan M, Deng L, Jian C, Wei M, et al. The effect of visual stimuli on stability and complexity of postural control. *Front Neurol*. 2018; Feb 8; 9: 48. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00048> PMID: 29472888
26. Guerraz M, Bronstein AM. Mechanisms underlying visually induced body sway. *Neurosci Lett*. 2008; 443(1): 12–16.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.07.053> PMID: 18672020
27. Smart LJ, Stoffregen TA, Bardy BG. Visually induced motion sickness predicted by postural instability. *Hum Factors*. 2002; 44(3): 451–465.
<https://doi.org/10.1518/0018720024497745> PMID: 12502162

28. Lee DN, Lishman JR. Visual proprioceptive control of stance. *J Hum Mov Stud*. 1975; 1: 87–95.
29. Mergner T, Schweigart G, Maurer C, Blumle A. A Human postural responses to motion of real and virtual visual environments under different support base conditions. *Exp Brain Res*. 2005; 167: 535–556.
<https://doi.org/10.1007/s00221-005-0065-3> PMID: 16132969
30. Stoffregen T. A. Flow structure versus retinal location in the optical control of stance. *J Exp Psychol: Hum Percept Perform*. 1985; 11: 554–565.
31. Kerr B, Condon SM, McDonald LA. Cognitive Spatial Processing and the Regulation of Posture. *J Exp Psychol: Hum Percept Perform*. 1985; 11(5): 617–622. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.11.5.617> PMID: 2932533
32. Bayot M, Dujardin K, Tard C, Defebvre L, Bonnet CT, Allart E, et al. The interaction between cognition and motor control: A theoretical framework for dual-task interference effects on posture, gait initiation, gait and turning. *Neurophysiol Clin [Internet]*. 2018; 48(6): 361–75. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2018.10.003> PMID: 30487064
33. Donker SF, Roerdink M, Greven AJ, Beek PJ. Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Exp Brain Res*. 2007; 181(1): 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-0905-4> PMID: 17401553
34. Potvin-Desrochers A, Richer N, Lajoie Y. Cognitive tasks promote automatization of postural control in young and older adults. *Gait Posture [Internet]*. 2017; 57:40–5. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.05.019> PMID: 28570861
35. Plummer P, Eskes G, Wallace S, Giuffrida C, Fraas M, Campbell G, et al. Cognitive-motor interference during functional mobility after stroke: State of the science and implications for future research. *Arch Phys Med Rehabil [Internet]*. 2013; 94(12): 2565–2574.e6. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.08.002> PMID: 23973751
36. Chong RKY, Mills B, Dailey L, Lane E, Smith S, Lee K-H. Specific interference between a cognitive task and sensory organization for stance balance control in healthy young adults: Visuospatial effects. *Neuropsychologia*. 2010; 48(9): 2709–18.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.018> PMID: 20478320
37. Maylor EA, Wing AM. Age Differences in Postural Stability are Increased by Additional Cognitive Demands. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*.

1996; 51B(3): 143–54. <https://doi.org/10.1093/geronb/51b.3.p143> PMID: 8620354

38. Maylor E, Allison S, Wing A. Effects of spatial and nonspatial cognitive activity on postural stability. *Br J Psychol*. 2001; 92: 319–38.

39. Tixier M, Cian C, Barraud PA, Laboissiere R, Rousset S. The interaction between long-term memory and postural control: Different effects of episodic and semantic tasks. *Motor Control*. 2021; 25(2): 182–97. <https://doi.org/10.1123/mc.2020-0061> PMID: 33421961

40. Ramenzoni VC, Riley MA, Shockley K, Chiu CYP. Postural responses to specific types of working memory tasks. *Gait Posture*. 2007; 25(3): 368–73. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.04.014> PMID: 16806935

41. Chen Y, Yu Y, Niu R, Liu Y. Selective Effects of Postural Control on Spatial vs. Nonspatial Working Memory: A Functional Near-Infrared Spectral Imaging Study. *Front Hum Neurosci*. 2018; 12(June): 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00001> PMID: 29387003

42. Vander Velde T, Woollacott M. Non-visual spatial tasks reveal increased interactions with stance postural control. *Brain Res*. 2008; 1208: 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.03.005> PMID: 18394592

43. Horak FB, Nashner LM. Central programming of postural movements: adaptation to altered support surface configurations. *J Neurophysiol*. 1986; 55(6): 1369–1381. <https://doi.org/10.1152/jn.1986.55.6.1369> PMID: 3734861

44. Horak FB, Machpherson JM. Postural orientation and equilibrium. In: Rowell B, Shepard JT, editors. *Handbook of physiology. Exercise: regulation and integration of multiple systems*. New York: Oxford University Press; 1996. pp. 255–292.

45. Dault MC, Yardley L, Frank JS. Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms? *Cogn Brain Res*. 2003; 16(3): 434–40. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(03\)00058-2](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(03)00058-2) PMID: 12706223

46. Cerles M, Guinet E, Rousset S. Mutual interferences between automatic ongoing spatial-updating with self-motion and source recall. *Conscious Cogn* [Internet]. 2015; 36: 103–12. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053810015001439> <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.06.006> PMID: 26117154

47. Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, Lovett EG, Myklebust BM. Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and

elderly adults. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1996; 43(9): 956–966.

<https://doi.org/10.1109/10.532130> PMID: 9214811

48. Ramdani S, Seigle B, Lagarde J, Bouchara F, Bernard PL. On the use of sample entropy to analyze human postural sway data. *Med Eng Phys.* 2009; 31(8): 1023–31. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2009.06.004> PMID: 19608447

49. Roerdink M, De Haart M, Daffertshofer A, Donker SF, Geurts ACH, Beek PJ. Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Exp Brain Res.* 2006; 174(2): 256–69. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0441-7> PMID: 16685508

50. Stins JF, Michielsen ME, Roerdink M, Beek PJ. Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: Effects of expertise, vision and cognition. *Gait Posture.* 2009; 30(1): 106–9. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.04.001> PMID: 19411174

51. Polskaia N, Richer N, Dionne E, Lajoie Y. Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention. *Gait Posture [Internet].* 2015; 41(2): 454–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.11.009> PMID: 25554460

52. Woollacott M, Shumway-cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture.* 2002; 16: 1–14. [https://doi.org/10.1016/s0966-6362\(01\)00156-4](https://doi.org/10.1016/s0966-6362(01)00156-4) PMID: 12127181

53. Wulf G, McNevin N, Shea CH. The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *Q J Exp Psychol Sect A Hum Exp Psychol.* 2001; 54(4): 1143–54. <https://doi.org/10.1080/713756012> PMID: 11765737

54. Navon D, Gopher D. On the economy of the human-processing system. *Psychol Rev.* 1979; 86(3): 214–55.

55. Wickens CD. The structure of attentional resources. In: Nickerson RS, editor. *Attention and performance VIII.* Hillsdale, NJ: Erlbaum; 1980. pp. 239–

56. Tanahashi S, Ujike H, Ukai K. Visual rotation axis and body position relative to the gravitational direction: Effects on circular vection. *Iperception.* 2012; 3(10): 804–19. <https://doi.org/10.1068/i0479> PMID: 23483823

57. Thilo KV, Gresty MA. Visual motion stimulation, but not visually induced perception of self-motion, biases the perceived direction of verticality. *Brain Res Cogn Brain Res.* 2002; 14: 258–263. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(02\)00126-x](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(02)00126-x) PMID: 12067698