



**HAL**  
open science

# Effets d'interférence dans l'estimation des magnitudes

Kévin Vidaud-Laperrière

► **To cite this version:**

Kévin Vidaud-Laperrière. Effets d'interférence dans l'estimation des magnitudes. Psychologie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2021. Français. NNT : 2021MON30049 . tel-03602915

**HAL Id: tel-03602915**

**<https://theses.hal.science/tel-03602915v1>**

Submitted on 9 Mar 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

Délivré par l'Université Paul Valéry – Montpellier III

Préparée au sein de l'école doctorale 60 « **Territoires,  
Temps, Sociétés, Développement** »  
Et de l'unité de recherche EA 4556 « Laboratoire Epsilon »

Spécialité : **Psychologie Cognitive**

Présentée par **Monsieur Kévin Vidaud-Laperrière**

## Effets d'interférence dans l'estimation des magnitudes

Soutenue le **14 décembre 2021** devant le jury composé de

M.	<b>Arnaud BADETS,</b>	CR-HDR,	Université de Bordeaux	Rapporteur
M.	<b>Jordan NAVARRO,</b>	MCF-HDR,	Université Lumière Lyon II	Rapporteur
Mme.	<b>Céline LEMERCIER,</b>	PU,	Université Toulouse - Jean Jaures	Examinatrice
M.	<b>André TRICOT,</b>	PU,	Université Paul Valéry Montpellier III	Président du jury
Mme.	<b>Arielle SYSSAU- VACCARELLA,</b>	PU,	Université Paul Valéry Montpellier III	Directrice
Mme.	<b>Pom CHARRAS,</b>	MCF,	Université Paul Valéry Montpellier III	Co-directrice



## REMERCIEMENTS

Si je devais résumer ma thèse aujourd'hui avec vous, je dirais que c'est d'abord des rencontres, des gens qui m'ont tendu la main, peut-être à un moment où je ne m'y attendais pas, où j'en avais besoin. Et c'est assez curieux de se dire que les hasards, les rencontres, forgent une destinée... Parce que quand on a le goût de la chose, quand on a le goût de la chose bien faite, le beau geste, parfois on trouve l'interlocuteur en face, je dirais, le miroir qui nous aide à avancer.

C'est pourquoi je souhaite remercier toutes les personnes sans qui cette thèse n'aurait pu être telle qu'elle est aujourd'hui. Je remercie donc en premier lieu mes directrices de thèse, Arielle Syssau-Vaccarella et Pom Charras, pour m'avoir enseigné, accompagné et soutenu durant toutes ces belles années. Nos échanges étaient toujours éclairants, agréables, et motivants. Vous êtes et resterez, chacune, une source d'inspiration pour moi.

Je souhaite également remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de lire et de discuter de ce travail de recherche.

Un énorme merci à toutes les personnes ayant participé à nos expériences, pour le temps et l'énergie que vous nous avez consacrés.

Je remercie l'ensemble des membres du laboratoire Epsilon qui ont d'une manière ou d'une autre contribué à l'avancée de cette thèse. En particulier Mr Brouillet pour m'avoir initié à ce domaine de recherche, et Mr Brunel pour ses nombreuses interventions et coups de pouce tout au long de ces années.

Merci également aux doctorant(e)s et docteurs qui m'ont aidé, avec qui j'ai pu échanger, débattre, et rire ! Je remercie tout particulièrement Conchita pour l'aide qu'elle m'a apportée, spécifiquement pour cette thèse. Jean-Christophe pour tout ce qui concernait l'administratif (quel enfer !), t'es le boss J-C ! Philippe et Vincent pour nos nombreux et riches échanges, en espérant qu'ils perdurent dans le temps ! Lorene pour toutes les fois où tu m'as sauvé la mise, et ça depuis le master déjà haha ! Marie-Julie pour avoir imposé le calme et le silence dans le bureau des doctorants, ainsi que pour t'avoir aidée à te concentrer pendant que les autres chahutaient, ça fait du bien de se sentir utile haha ! Enfin, Lola, Christine, Édouard, Sybille, Adil, José, Draushika et tous ceux que j'ai oublié, merci pour nos discussions et d'avoir contribué à la bonne humeur générale au laboratoire.

También me gustaría agradecer a Conchi, Juan y Juan Carlos por su cálida bienvenida, por guiarme y por pasar mucho tiempo conmigo cuando vine a Granada. Sin mencionar a los estudiantes de doctorado, especialmente a Tao por su benevolencia, ya María por enseñarme a usar EEG y biopac.

Je souhaite aussi adresser un immense merci à Mr Chalange, vous êtes l'enseignant qui m'a donné goût à la science, c'est en grande partie grâce à vous si je suis allé aussi loin.

Je remercie bien évidemment ma petite femme, qui m'a toujours soutenu et bougé le cul quand il le fallait ! Tu ne peux pas imaginer à quel point je me sens reconnaissant à ton égard avec tous les sacrifices que tu as faits, et que tu continues de faire. Tu es ma principale source de motivation, de bonheur et de joie.

Je tiens également à dire merci à toute ma famille, mes grands-parents, mes parents, Mimi, Cahuète, Mama, Priscilla, Lena, Matheo, Emmy, Lou, Hervé, Lydie, Jeff, Marie, Evan, Philippe, Delphine, Émeline, Romain et Gatien. Merci à vous tous de faire partie de ma vie, et de la rendre si belle.

Gracias a Santos, Sonia, Julio y Jimena por recibirnos tan bien en España y por vuestra generosidad. Espero que nuestra amistad dure muchos años. ¡Los extrañamos!

Enfin, je remercie tou(te)s mes ami(e)s qui m'accompagnent depuis toutes ces années, Killian, Samuel, Gaétan, Charly, Léa, Tristan, Marie, Tanya, Mick, Anthony, Valentin, Robin, et tous ceux que j'ai oublié !

## Financement

Cette thèse a été financée par une allocation de recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche versée par L'Université Paul Valéry Montpellier III. Elle a été réalisée au sein de l'équipe de recherche CECE du Laboratoire Epsilon, EA 4556 et de l'École Doctorale 60 "Territoire, Temps, Sociétés et Développement".



# RÉSUMÉ

La majorité des systèmes vivants sont capables d'extraire des informations disponibles dans l'environnement pour estimer des magnitudes. De nombreuses études ont mis en évidence que le traitement de l'espace, du temps et de la numérosité présente des similarités. Deux courants théoriques s'opposent quant à la modélisation du système de traitement des grandeurs. La théorie AToM (Walsh, 2003) défend l'idée d'un système sans hiérarchie ; alors que d'autres, comme la théorie CMT (Casasanto & Boroditsky, 2008) attribuent un rôle prépondérant à l'espace au sein du système. Des processus dédiés au traitement des informations spatiales seraient détournés, adaptés pour rendre possible l'estimation d'autres magnitudes, telles que la numérosité ou le temps (voir Leibovitch et al., 2017). Le principal argument en faveur de cette hiérarchisation est l'asymétrie des effets d'interférence espace-temps. L'espace biaise nos estimations temporelles (effet **Kappa**), alors que le temps ne semble pas, ou très peu, influencer nos estimations spatiales (effet **Tau**). L'objectif de cette thèse est d'étudier les conditions d'émergence de l'effet Tau pour affiner les modèles théoriques de l'estimation des magnitudes. Est-il possible d'obtenir une symétrie, voire une asymétrie "inversée", des effets d'interférence espace-temps ? Pourquoi l'effet Tau nécessite une demande élevée en ressources cognitives pour émerger, mais pas l'effet Kappa ? Pour répondre à ces questions, nous avons mis en place un protocole utilisant des tâches d'estimations temporelles et spatiales, durant lesquelles le temps et l'espace variaient de manière orthogonale. La première étude montre qu'en réduisant la discriminabilité des distances, le coût cognitif de la tâche spatiale augmente. Par ricochet, l'effet Tau est amplifié, allant même jusqu'à provoquer une asymétrie inverse des interférences ( $\text{Tau} > \text{Kappa}$ ). La seconde étude permet d'écarter l'impact de biais méthodologiques dans les premières expériences. Elle met aussi en lumière un lien entre les performances interindividuelles des participants, et la force de leur effet Tau. De manière plutôt contre-intuitive, cette étude montre que plus un participant est efficace pour estimer l'espace, plus il est interféré par le temps. La troisième étude montre que les effets Tau et Kappa ne sont pas impactés de la même manière par des contextes émotionnels négatifs. L'effet Tau est insensible aux inductions émotionnelles, alors que l'effet Kappa, lui, est amplifié. Nous interprétons l'ensemble de nos résultats en proposant que les effets Tau et Kappa ne prennent pas leurs origines aux mêmes étapes du traitement de l'information. Par conséquent, ils ne seraient pas issus du même processus, et donc du même système. Ces observations nous amènent finalement à questionner l'importance de cette signature comportementale au sein du débat sur la hiérarchisation du système commun du traitement des magnitudes.

**Mots-clés** : perception du temps, perception de l'espace, interférences espace-temps, théorie AToM, théorie CMT

# ABSTRACT

Human beings, as many other species, are able to extract information from the surroundings so as to estimate spatial and temporal magnitudes. Many studies converge to suggest that the processing of space, time and even numerosity shows many common signatures. Two main theoretical accounts are under debate in the literature; they agree on the existence of a system dedicated to magnitude processing, but propose different hierarchical organizations. The AToM theory (Walsh, 2003) assumes that space, time and number are equally represented in the system, while others theories, such as the CMT theory (Casasanto & Boroditsky, 2008) assigns a prominent role to space. The system would be initially devoted to space processing, and would have phylogenetically and ontogenetically evolved to take over the processing of other magnitudes (Leibovitch et al., 2017). For instance, the main argument in favor of the CMT theory relies on the asymmetry of space-time interference effects. Space biases temporal estimations (**Kappa** effect) to a greater extent than time does on spatial judgements (**Tau** effect). Time indeed seems to have little or even no influence on spatial estimations. The main objective here was to investigate the experimental conditions under which a Tau effect would emerge. We wonder whether one could expect to obtain symmetric interference effects. Why does the Tau effect require a high demand in cognitive resources to emerge, but not the Kappa effect? To answer these questions, we set up a protocol using temporal and spatial estimation tasks, during which durations and covered distances varied orthogonally. The first experimental study described here shows that by reducing distance discriminability, the cognitive cost of the spatial task increases. In turn, the Tau effect was significantly enhanced, leading to a superiority of the Tau over the Kappa effect (inverse interference asymmetry,  $\text{Tau} > \text{Kappa}$ ). The second experimental work addresses the impact of some potential methodological biases in the previous experiments. Overall, the results highlight a link between inter-individual performance and the strength of the Tau effect. Surprisingly, the more efficient spatial judgments are, the larger the Tau effect. The third part of this thesis focuses on the influence of negative emotional contexts on time and space perception, and on the interference effects (Tau and Kappa effects). The Tau effect is immune to emotional inductions, while the Kappa effect is amplified. Overall, the results led us to hypothesize that the Tau and Kappa effects originate from different stages of information processing. Consequently, the interference effects would not stem from the same process, and neither from the same generalized magnitude system. Eventually, the current investigation mainly questions the relevance of using interference effects as a behavioral piece of evidence in favor of one theory over another, the two competing on the hierarchical status of space in the system of magnitude processing.

**Keywords:** time perception, space processing, space-time interference, AToM theory, CMT theory

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Objectifs de la thèse</b> .....	5
<b>Chapitre 1 : Les estimations de magnitude</b> .....	7
<b>1.1 Les magnitudes</b> .....	7
1.1.1 Les estimations de numérosité .....	7
1.1.2 Les estimations spatiales.....	11
1.1.3 Les estimations temporelles.....	15
<b>1.2 Les modèles théoriques du système commun du traitement des magnitudes</b> .....	18
1.2.1 La théorie AToM ("A Theory of Magnitude").....	19
1.2.2 La théorie de la métaphore conceptuelle (CMT) .....	24
<b>Chapitre 2 : Les effets d'interférence entre les magnitudes</b> .....	26
<b>2.1 L'espace et la numérosité</b> .....	26
<b>2.2 La numérosité et le temps</b> .....	34
<b>2.3 Le temps et l'espace</b> .....	38
<b>Conclusion</b> .....	43
<b>Chapitre 3 : Émotions et magnitudes</b> .....	45
<b>3.1 Les émotions</b> .....	45
<b>3.2 L'impact des émotions sur nos capacités cognitives</b> .....	47
3.2.1 Emotions et attention .....	47
3.2.2 Emotions et mémoire .....	48
3.2.3 Emotions et prises de décision .....	49
<b>3.3 Les émotions et les magnitudes</b> .....	51
<b>Conclusion</b> .....	57
<b>Objectifs des chapitres expérimentaux</b> .....	58
<b>Chapitre 4 : Relativité des effets d'interférence espace-temps</b> .....	61
<b>Introduction</b> .....	61
<b>4.1 Résumé de l'expérience 1 - Reproduction de l'asymétrie Kappa &gt; Tau</b> .....	67
<b>4.2 Résumé de l'expérience 2 - Asymétrie inversée, Tau &gt; Kappa</b> .....	71
<b>4.3 Résumé de l'expérience 3 - Amplification de Tau en intra-sujets</b> .....	74
<b>Exploring spatiotemporal interactions: On the superiority of time over space</b> .....	80
<b>Conclusion et discussion</b> .....	105
<b>Chapitre 5 : Différences inter-individuelles et effets d'interférence</b> .....	110
<b>Introduction</b> .....	110

<b>5.1 Expérience 4 – Adaptation méthodologique du protocole expérimental</b> .....	115
Introduction.....	115
Méthode.....	116
Résultats .....	120
Conclusion .....	124
<b>5.2 Expérience 5 – Performances inter-individuelles et effets d’interférence</b> .....	125
Introduction.....	125
Méthode.....	127
Résultats .....	130
Conclusion .....	136
<b>Discussion</b> .....	138
<b>Chapitre 6 : Effets d’interférence et émotions</b> .....	142
<b>Introduction</b> .....	142
<b>6.1 Expérience 6 – L’impact des émotions sur les effets d’interférence</b> .....	144
Introduction.....	144
Méthode.....	146
Résultats .....	152
Conclusion .....	164
<b>Discussion</b> .....	168
<b>Discussion générale</b> .....	173
<b>Rappel du cadre théorique</b> .....	173
<b>Résumés des chapitres expérimentaux</b> .....	177
Relativité des effets d’interférence espace-temps.....	178
Différences inter-individuelles et effets d’interférence.....	180
Effets d’interférence et émotions.....	182
Interprétation théorique.....	183
<b>Conclusion générale</b> .....	186
Apports théoriques.....	186
Critique méthodologique .....	188
Ouvertures en recherche fondamentale.....	190
Applications des études sur le traitement des magnitudes.....	191
<b>Bibliographie</b> .....	194

# **Introduction**

"Un grand pouvoir implique de grandes responsabilités". Mais comment sait-on qu'un pouvoir ou qu'une responsabilité est qualifiable de "grande" ? Nous sommes capables de communiquer vocalement des informations très précises avec nos semblables, nous pouvons nous servir d'outils pour réaliser des tâches manuellement impossibles ou presque, nous pouvons même acquérir de nouvelles connaissances, se divertir, se questionner, ou même rire, en lisant des écrits. Toutes ces capacités sont qualifiables de "grandes" si l'on se réfère au monde animal, mais elles semblent finalement assez banales si l'on se réfère aux surprenantes capacités de l'être humain. De la même manière, se marier, ou réussir ses examens relève d'une grande responsabilité dans la vie d'un être humain, mais c'est bien peu de choses comparés à la responsabilité que représente le sauvetage de la planète face à la crise écologique actuelle, du point de vue de l'humanité.

Selon le référentiel, nous sommes capables d'estimer si une chose est plus ou moins importante qu'une autre. Nous pouvons par exemple comparer le poids d'un poireau, l'intensité du goût de pois, ou même la dureté de morceaux de poix. Nous pouvons aussi, sans besoin de comparer, estimer si une chose est plutôt petite ou grande, comme estimer la concentration en sel d'une côte de bœuf, la taille d'une cotte que l'on vient de pêcher, ou même le temps que nous allons mettre pour monter une côte bien pentue. Aucun jour ne passe sans que nous fassions des estimations. Elles sont inéluctables, et bien souvent automatiques et non-conscientes. En situation de conduite, la vue d'un rond-point sur notre route nous force à effectuer une estimation spatiale, afin de déterminer à partir de quel endroit sur la route nous devons commencer à freiner. Nous déterminons ce "début de freinage" en nous basant sur la position du rond-point, et en estimant la distance nécessaire pour effectuer le freinage complet.

Dans la majorité des cas, les estimations sont involontaires, automatiques, et sont donc fortement liées au fonctionnement primaire de notre cognition. Une grande majorité des espèces animales sont capables d'effectuer des estimations avec précision. Cependant, l'être humain est la seule espèce capable de communiquer symboliquement au sujet de ces estimations. Il est en effet possible d'effectuer des estimations volontaires et conscientes afin d'affiner la précision de notre jugement. Les estimations de magnitudes (grandeurs) sont relativement précises, il est par exemple assez simple d'estimer en voyant une salle remplie de 50 personnes que la salle est composée de plus de 30 personnes sans avoir besoin de compter. "Relativement" précise car bien que nous soyons en mesure d'être proche du nombre exact, il serait totalement fortuit de tomber sur le résultat réel. En cela, nous pouvons différencier une "estimation" d'une "analyse" (compter, mesurer...). Par ailleurs, la numérosité est la seule magnitude (grandeur) que nous sommes capables d'analyser afin d'en connaître le résultat exact (en comptant), pour chacune des autres magnitudes nous devons utiliser des outils de mesure (mètres, chronomètres, balances...).

En plus d'être utile dans la vie de tous les jours, cette capacité d'estimation des magnitudes (grandeurs) est très étudiée en psychologie expérimentale. Les trois magnitudes les plus étudiées sont l'espace, le temps, et la numérosité. Plusieurs études récentes ont mis en évidence qu'il existerait un lien entre notre capacité à estimer la numérosité étant enfant, et notre capacité à apprendre les mathématiques à l'école (Chu & Geary, 2015 ; Libertus, Feigenson & Halberda, 2013 ; Starr, Libertus & Brannon, 2013 ; van Marle, Chu, Li & Geary, 2014). Cette avancée scientifique est particulièrement intéressante, car il existe une littérature exhaustive au sujet de l'estimation de la numérosité. Parmi les études sur ce thème, bon nombre d'entre elles font référence à un système commun du traitement des magnitudes (SCTM).

En 2003, après avoir fait le lien entre plusieurs résultats d'expériences, Walsh propose une théorie sur l'estimation des magnitudes qu'il nomme AToM (A Theory of Magnitude).

Cette théorie suggère l'existence d'un système de traitement commun à toutes les magnitudes. Selon cette idée, quelle que soit la magnitude en jeu, les mêmes processus cognitifs seraient à l'œuvre afin d'effectuer cette estimation. L'intérêt de ce système serait de simplifier la gestion et le contrôle des actions nécessitant de prendre en compte les différentes magnitudes de notre environnement. Bien que l'existence d'un système commun du traitement des magnitudes soit étudiée et largement documentée, il existe à l'heure actuelle des désaccords vis-à-vis de la hiérarchisation des magnitudes au sein de ce système. En effet, selon certains chercheurs, l'espace serait la magnitude maîtresse dans le système de traitement des magnitudes (Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou & Boroditsky, 2010 ; Leibovich, Katzin, Harel & Henik, 2017). La raison serait que l'espace est la magnitude la plus "concrète", celle que nous utilisons depuis le plus jeune âge, et le plus souvent au cours de notre vie. Ainsi, nous baserions sur notre capacité à estimer l'espace pour pouvoir estimer les autres magnitudes.

Un des arguments forts prônant l'existence du système de traitement des magnitudes est la réciprocité des effets d'interférence. Un effet d'interférence se produit lorsqu'une caractéristique quantifiable d'un stimulus est estimée, et que cette estimation est influencée par une autre caractéristique quantifiable de ce stimulus. En outre, si vous deviez par exemple estimer la durée de présentation d'une ligne (en tant que durée courte ou durée longue), cette estimation serait biaisée par la longueur de cette ligne. Plus la ligne est petite, plus vous sous-estimeriez sa durée de présentation, et, réciproquement, plus la ligne est grande, plus vous surestimeriez sa durée de présentation. Cette interférence de l'espace sur notre estimation temporelle est **l'effet Kappa** (Cohen, Hansel & Sylvester, 1953 ; Price-Williams, 1954). Comme dit précédemment, les effets d'interférence font partie des arguments en faveur de l'existence du système commun du traitement des magnitudes car des expérimentations ont démontré l'existence d'effets d'interférence entre chaque magnitude ainsi que leur réciprocité. Il existerait donc un effet d'interférence de l'espace sur le temps, mais aussi du temps sur

l'espace, ainsi qu'un effet d'interférence numérosité-espace et numérosité-temps. Nous détaillerons tous ces différents effets dans le deuxième chapitre introductif.

Cependant, au fil des années, un nombre conséquent d'études ont fait le constat de l'absence d'interférence entre certaines magnitudes (Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al., 2010). Si l'effet de l'espace sur les autres magnitudes est robuste et largement répliqué, les effets du temps ou de la numérosité sur l'espace se révèlent être beaucoup plus fragiles. Constatant cela, des chercheurs ont proposé un modèle théorique différent du modèle AToM, la théorie de la métaphore conceptuelle (Conceptual Metaphor Theory ; CMT ; Lakoff & Johnson, 1980, 1999). Là où AToM suppose que chaque magnitude est traitée de manière équivalente par le système de traitement des magnitudes (ainsi, chaque magnitude interfère sur l'estimation des autres magnitudes), la CMT suggère que l'on utiliserait la capacité à estimer l'espace pour estimer les autres magnitudes. Ainsi, des caractéristiques spatiales, comme la longueur ou la taille, peuvent biaiser l'estimation des autres magnitudes, mais les autres magnitudes n'interféreraient pas quant à elles avec les estimations spatiales).

L'un des débats phares dans ce domaine de la psychologie expérimentale est l'existence ou non de l'effet du temps sur nos estimations spatiales, que l'on appelle "**effet Tau**". Cet effet est souvent négligé dans les résultats d'expérience car bien souvent trop faible ou fragile pour être discuté. Même quand il est significativement présent, il est moindre comparé à l'effet de l'espace sur nos estimations temporelles, que l'on appelle "**effet Kappa**". Bien que cela ne soit pas le seul, cet état de fait est le principal argument sur lequel s'appuient les chercheurs pour défendre la CMT. Cependant, la légitimité de l'utilisation des différences entre les effets d'interférence pour défendre un modèle plutôt qu'un autre commence à être remise en question. Certains chercheurs pointent du doigt que les effets d'interférence peuvent dépendre d'autres

facteurs comme l'attention, la charge mentale ou les émotions, mais que ces dépendances ne semblent pas être d'une importance égale selon les effets d'interférence.

## **Objectifs de la thèse**

Ayant pour objectif d'étudier les effets d'interférence et les implications théoriques sur le système de traitement des magnitudes (SCTM), les travaux de cette thèse aborderont les questions suivantes : Quelles sont les caractéristiques des interférences espace-temps dans l'estimation des magnitudes ? Comment utiliser ces effets d'interférence pour alimenter les modèles théoriques sur l'estimation des magnitudes ? Plus particulièrement, l'objectif de cette thèse est de questionner la réciprocity des interférences espace-temps : L'effet Tau (effet du temps sur les estimations spatiales) est-il nécessairement inférieur à l'effet Kappa (effet de l'espace sur les estimations temporelles) ? Dans quelles mesures les effets d'interférence Tau et Kappa sont symétriquement réciproques ? Dans quelles mesures sont-ils façonnés par nos performances en estimations spatiale et temporelle ? En quoi les émotions influent-elles sur nos estimations de magnitudes et, plus particulièrement, quels sont leurs impacts sur les différents effets d'interférence ? Quelle pertinence y a-t-il à utiliser les effets d'interférences entre espace et temps comme arguments en faveur d'un des modèles du système de traitement des magnitudes ? Quel modèle semble finalement le plus pertinent au regard de l'état actuel de nos connaissances ?

Dans le premier chapitre introductif, nous ferons une présentation générale des études impliquant chacune des trois principales magnitudes, à savoir la numérosité, l'espace et le temps, ainsi qu'une présentation des deux modèles théoriques en vogue sur le ou les système(s) commun(s) du traitement des magnitudes. Puis, dans le second chapitre introductif, nous effectuerons un état de l'art sur les effets d'interférences entre les magnitudes. Cette analyse descriptive de la littérature nous amènera à nous questionner sur la validité d'employer les

effets d'interférence comme arguments pour prendre position sur les modèles théoriques. Ensuite, le troisième chapitre sera consacré à l'impact des émotions sur les estimations de magnitudes ainsi que sur leurs effets d'interférence.

Dans le 4<sup>ème</sup> chapitre, trois expériences traitent des conditions d'émergence de l'effet d'interaction du temps sur l'espace : l'effet Tau. Le 5<sup>ème</sup> chapitre comprend deux expériences dont l'objectif est de répondre aux limites possibles des expériences précédentes. Ces expériences viennent également apporter des arguments pour une vision alternative du SCTM. Une dernière étude est présentée dans le dernier chapitre expérimental, dans lequel le lien entre magnitudes et émotions est testé afin de consolider nos hypothèses vis-à-vis du rôle des interférences dans le SCTM. Enfin, dans la dernière partie, après une synthèse des différents résultats expérimentaux, nous discutons de leur contribution au domaine ainsi que de certaines de leurs limites.

# Chapitre 1 : Les estimations de magnitude

Dans ce premier chapitre introductif, nous allons présenter l'état actuel des connaissances sur le traitement des trois principales magnitudes - numérosité, espace et temps - du point de vue comportemental et neuronal. Puis, nous vous présenterons les deux principales théories qui modélisent le système commun du traitement des magnitudes, ainsi que le fonctionnement de ce système de traitement tel que ces deux théories l'envisagent.

## 1.1 Les magnitudes

### 1.1.1 Les estimations de numérosité

L'être humain peut estimer des quantités numériques, sans avoir la nécessité de compter. Dans le film "Rain Man", un homme atteint du "syndrome du savant" arrive à estimer très précisément le nombre de cure-dents qui viennent de tomber à terre, juste devant lui. S'en suit une conversation avec son frère, devenue culte :

*-Quatre-vingt-deux, quatre-vingt-deux, quatre-vingt-deux cure-dents.*

*-Il y en a plus de quatre-vingt-deux par terre.*

*-Il y en a, deux cent quarante-six.*

(Extrait tiré du film "Rain Man" en 1989)

Si la plupart des humains ne sont pas capables d'estimer très exactement en un seul coup d'œil que 246 cure-dents sont tombés par terre, ils sont cependant capables d'estimer qu'il y en a plus que 82. En effet, nous pouvons estimer des quantités sans avoir besoin d'énumérer chaque élément qui compose cette quantité. En psychologie, cette capacité à pouvoir estimer approximativement des quantités fait référence à l' "estimation de numérosité" (ou "estimation des magnitudes numériques").

Dès l'âge de 6 mois, un enfant est capable de percevoir une différence de numérosité si le rapport entre les deux numérosités a un ratio 1/2 (du simple au double ; Xu & Spelke, 2000). Plus tard, vers l'âge de 10 mois, sa précision s'est suffisamment améliorée pour être capable de discerner une différence entre deux numérosités avec un ratio 2/3 (Xu & Spelke, 2000). Le "sens du nombre" est le nom que l'on donne à cette faculté qu'ont les enfants de pouvoir manipuler des quantités, alors même qu'il ne leur a jamais été formellement enseigné ce qu'est un nombre ou une quantité.

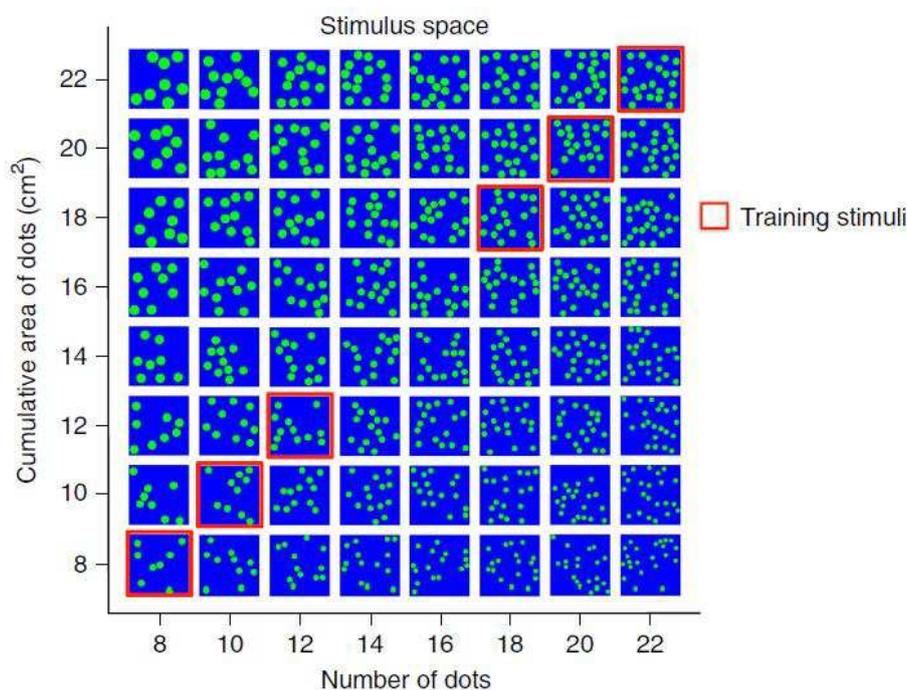
Cette capacité d'estimation de magnitudes numériques n'est pas le propre de l'Homme. Une grande variété d'espèces animales présente des capacités similaires (Meck & Church, 1983 ; Leon & Shadlen, 2003 ; McComb, Packer & Pusey, 1994 ; Nieder, Freedman, & Miller, 2002 ; Walsh, 2003). Le sens du nombre est donc inné et partagé avec les animaux. Cependant, l'Homme est la seule espèce à avoir inventé et à utiliser des symboles pour décrire des quantités avec plus de précision (notamment avec les chiffres arabes : 1, 2, 3, etc...). Nous sommes donc la seule espèce qui peut faire la différence entre 246 et 247 cure-dents, car nous utilisons des symboles pour compter un à un chaque cure-dent. Bien que compter un à un des éléments et estimer approximativement l'ensemble laisse penser qu'il s'agit de deux capacités clairement distinctes, il a été démontré qu'elles sont sous-tendues par des processus cognitifs communs.

Malgré un grand soutien en faveur de l'existence d'un système commun des magnitudes, censé permettre la représentation des quantités, d'autres chercheurs ont proposé un modèle alternatif vis-à-vis du traitement de la numérosité. Selon eux, trop de processus spécifiques à la numérosité sont engagés dans le traitement des quantités numériques. Cette théorie repose donc sur le système du nombre approximatif (ANS), considéré comme une structure innée et spécifique à la numérosité qui permettrait la représentation du nombre (Cantlon et al., 2009 ; Dehaene, 1997 ; Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen, 1998 ; Odic &

Starr, 2018). Cette théorie faisant l'objet d'un domaine de recherche à part entière, il nous semble important de l'explicitier.

L'un des arguments avancés en faveur de cette théorie est que lorsque l'on utilise un paradigme expérimental qui élimine les biais liés aux caractéristiques spatiales, les participants fondent leur décision principalement sur le nombre plutôt que sur les autres magnitudes (DeWind et al., 2015 ; Ferrigno et al., 2017). L'expérience de Ferrigno et al. (2017) est ainsi particulièrement démonstrative de cet effet. Dans cette recherche, les participants ont d'abord suivi une phase d'apprentissage durant laquelle ils devaient classer des nuages de points sans aucune instruction. Ils devaient soit appuyer à droite soit appuyer à gauche, au début au hasard, puis, en se fiant aux feedbacks qui leurs étaient donnés, comprendre la tâche par eux-mêmes. Les feedbacks correspondaient soit à "magnitude grande" soit à "magnitude petite", sans que les participants n'en soient informés. Les essais lors de cette phase d'entraînement étaient congruents en termes de surface occupée par les points et de nombre de points (peu de points = peu de surface occupée, et beaucoup de points = grande surface occupée). Les points étaient donc tous de tailles identiques, et plus il y avait de points, plus leur surface était grande. Pour répondre correctement, les participants pouvaient soit se baser sur la surface occupée par les points, soit sur le nombre de points. Après cette phase d'entraînement, les participants effectuaient le bloc expérimental, similaire à l'entraînement mais sans feedback, et avec une variation de la taille des points. Ainsi, les participants devaient juger des nuages de points dont le nombre était grand mais dont la surface occupée était petite, et inversement (grande surface, peu de points). Les résultats montrent que les participants avaient plutôt tendance à effectuer leurs jugements en fonction du nombre de points plutôt qu'en fonction de la surface occupée par les points (voir Figure 1). Ce résultat était observé pour toutes les catégories de participants de cette étude : des américains adultes, des enfants américains préscolaires de 4-5 ans, des

adultes chimanes qui sont issues d'une culture où les connaissances numériques sont peu développées, et même avec un échantillon de singes.



**Figure 1.** Exemples de nuages de points utilisés dans l'expérience de Ferrigno et al., en 2017. Les nuages de points encadrés en rouge constituaient des nuages de points présentés lors des phases d'entraînement.

Ce type d'études tend à démontrer que l'estimation de numérosités est robuste et finalement peu, voire pas, influencée par d'autres magnitudes (les caractéristiques spatiales et temporelles notamment), confortant la théorie ANS qui envisage que le traitement de la numérosité serait prioritaire vis-à-vis des autres magnitudes.

Sur le plan neuronal, de nombreuses études s'accordent pour dire que le traitement de la numérosité provoque l'activation du sillon intrapariétal (Cantlon, Brannon, Carter & Pelphrey, 2006 ; Castelli, Glaser & Butterworth, 2006 ; Dormal & Pesenti, 2013 ; Fias et al., 2003 ; Pesenti et al., 2000 ; Piazza, Mechelli, Price & Butterworth, 2006). Certaines études ajoutent que le cortex frontal aurait aussi un rôle à jouer (Ansari & Dhital, 2006 ; Piazza et al., 2006). Des études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) ont également

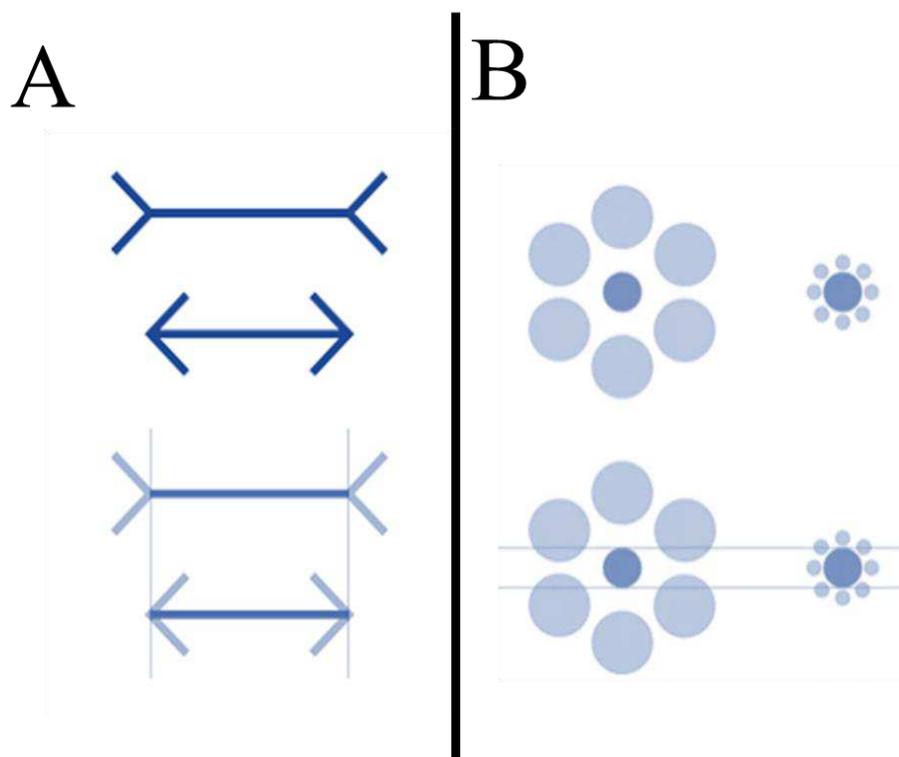
souligné le rôle du sillon intrapariétal, en induisant des difficultés à traiter de la numérosité en stimulant cette zone du cerveau. De plus, des données révèlent que les enfants atteints de dyscalculie (un trouble qui affecte le traitement de la numérosité, e.g. Hurks & van Loosbroek, 2014 ; Vicario et al., 2012) ont une activation plus faible du sillon intrapariétal lorsqu'ils effectuent des tâches de numérosité, comparés aux enfants non-dyscalculiques (Mussolin et al., 2010 ; Price et al., 2007).

De récentes recherches démontrent que plus un enfant est précis pour estimer ou comparer des numérosités, plus ses aptitudes en mathématiques à l'école sont élevées (Bonny & Lourenco, 2013 ; Chen & Li, 2014 ; Chu & Geary, 2015 ; Odic et al., 2016 ; van Marle, Chu, Li, & Geary, 2014). De plus, la précision dans les tâches de comparaison de numérosité semble avoir un caractère prédictif des futures performances en mathématiques chez les enfants de 4-5 ans (Chu & Geary, 2015 ; Libertus, Feigenson, & Halberda, 2013 ; Starr, Libertus, & Brannon, 2013 ; van Marle, Chu, Li, & Geary, 2014). Des études utilisant des tâches d'estimation numérique avec des nuages de points ont mis en évidence que les enfants de 6 à 12 ans ayant une mauvaise précision dans ce domaine sont aussi ceux qui ont de mauvaises performances en mathématiques. Inversement, les enfants avec une bonne précision sont, en moyenne, ceux qui réussissent le mieux les tests de performance en mathématiques (Anobile, Castaldi, Turi, Tinelli, & Burr, 2016). De manière similaire, les adolescents ayant un haut niveau en mathématiques ont un plus haut niveau de précision, et donc une meilleure capacité d'estimation approximative des magnitudes numériques (Wang et al., 2017).

### ***1.1.2 Les estimations spatiales***

Dans cette thèse, le terme "espace" est utilisé pour refléter des jugements portant sur des distances, des longueurs, ou des tailles, puisque les études qui composent la littérature sur ce sujet utilisent systématiquement des stimuli à une ou deux dimensions.

Nous sommes capables d'estimer approximativement des distances, des longueurs ou des tailles sans pour autant avoir besoin de les mesurer précisément avec un outil. Cette capacité est nécessaire pour la vie quotidienne, ne serait-ce que pour se mouvoir et interagir avec notre environnement. On peut attraper la tasse de café située sur le bureau à droite de notre ordinateur en un rien de temps parce que nous savons estimer assez précisément la distance que doit parcourir notre main pour y arriver du premier coup, même les yeux fermés. L'estimation des caractéristiques spatiales de notre environnement peut parfois sembler non contrôlée, automatique, involontaire. La capacité à estimer l'espace est relativement précise car nous pouvons effectuer des estimations très proches des distances réelles. Mais il est bien rare que notre estimation soit parfaitement égale à la distance mesurée à l'aide d'un outil. Cette imprécision est en partie liée au fait que nos estimations spatiales sont soumises à de nombreux biais cognitifs. Le moyen le plus simple de s'en rendre compte est de s'intéresser aux illusions d'optique telles que, par exemple, l'illusion de Müller-Lyer (1889) ou l'illusion d'Ebbinghaus (1885) par exemple (voir Figure 2).

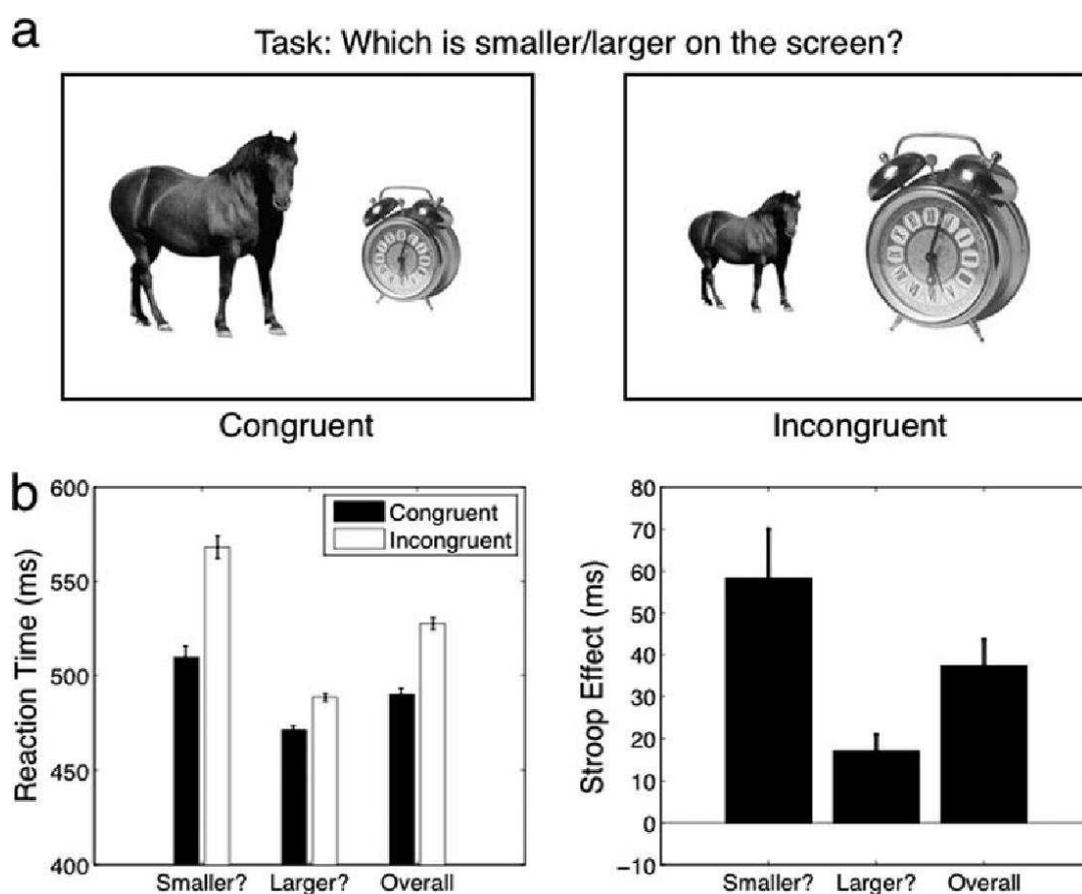


**Figure 2.** Le panel A est une illustration de l'illusion de Müller-Lyer (1889). Le panel B est une illustration de l'illusion d'Ebbinghaus (1885).

Dans l'illusion de Müller-Lyer, si la ligne à estimer se trouve entre des symboles dont les segments pointent vers l'extérieur ">" et "<", alors elle est perçue comme étant plus longue que lorsque cette même ligne se trouve entre des symboles dont les segments pointent vers l'intérieur "<" et ">". L'illusion d'Ebbinghaus illustre également les effets de contexte mais cette fois dans l'estimation d'une surface. Le disque central semble plus petit lorsqu'il est entouré par des grands disques que lorsqu'il est entouré par des petits disques.

La taille perçue d'images peut également être influencée par des connaissances stockées en mémoire à long terme (Konkle & Oliva, 2012a, 2012b). En effet, comparer la taille de l'image d'un cheval avec la taille de l'image d'un réveil, le cheval étant dans la vie réelle beaucoup plus grand qu'un réveil, est bien plus coûteux quand la taille physique des images présentées va à l'encontre de la taille prototypique (voir Figure 3). S'il s'avère que l'image du

réveil est plus grande que l'image du cheval, comparé au cas où c'est l'image du cheval qui est plus grande que l'image du réveil (situation congruente).



**Figure 3.** Le panel A représente un exemple d'essai congruent (taille de l'image du cheval plus grande que la taille de l'image du réveil) et d'un essai incongruent (taille de l'image du cheval plus petite que la taille de l'image du réveil, alors qu'un cheval est censé être plus grand dans la vraie vie). Le panel B est composé d'un diagramme en bâton sur les temps de réaction des participants en fonction de la congruence et de la question posée, ainsi que d'un autre diagramme en bâton montrant la différence entre les temps de réaction en situation "congruent" et en situation "incongruente" (Konkle & Oliva, 2012a).

Cet effet, comparable à un effet stroop, ou plus simplement à un effet de la taille congruente, fonctionne aussi avec des mots, dont les participants doivent estimer la taille de police (Shen, et al., 2016). Un autre effet similaire a aussi été montré il y a longtemps, l'effet de la congruence sémantique, décrivant une augmentation du temps de réaction lorsque l'on doit estimer parmi deux petits objets/animaux lequel est le plus grand (par exemple entre un

écureuil et une souris), comparé à la situation où la tâche est de déterminer lequel des deux est le plus petit (Petrušić, 1992).

Nos estimations spatiales sont aussi influençables par le contexte dans lequel nous nous trouvons. Il a ainsi été montré que selon notre état physiologique ou nos capacités physiques, nous percevons l'espace différemment (Proffitt & Linkenauger, 2013 ; Schnall et al., 2010 ; Taylor et al., 2011 ; White et al., 2013 ; Witt & Proffitt, 2005, 2008 ; Witt & Sugovic, 2010). Par exemple, nous aurons tendance à surestimer une distance si l'on porte un sac à dos lourd, ou si nous sommes fatigués (Bhalla & Proffitt, 1999).

Sur le plan neurologique, il est intéressant de remarquer que le traitement de l'espace semble être fortement associé aux sillons intrapariétaux (Dormal, Andres & Pesenti, 2012 ; Cantlon et al., 2006). Des études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) ont également souligné le rôle du sillon intrapariétal (Bjoertomt, Cowey, & Walsh, 2002 ; Dormal, Andres & Pesenti, 2012), du cortex pariétal postérieur (Göbel, Calabria, Farne, & Rossetti, 2006) et du cortex pariétal droit dans le traitement de l'espace (Bjoertomt, Cowey & Walsh, 2002 ; Fierro et al., 2000 ; Fierro, Brighina, Piazza, Oliveri & Bisiach, 2001).

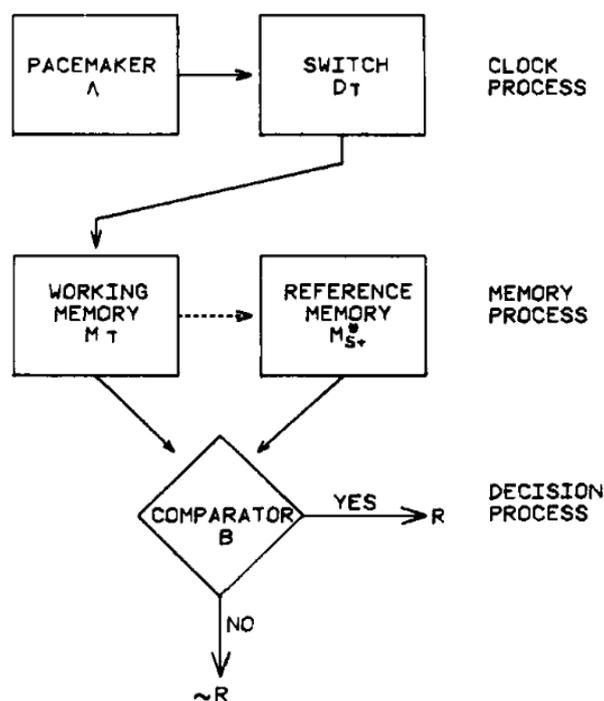
### ***1.1.3 Les estimations temporelles***

En mathématiques, le temps peut être utilisé pour modéliser une 4<sup>ème</sup> dimension. Pour autant, il ne nous apparaît pas comme étant quelque chose d'aussi concret que l'espace. Le temps nous semble plus abstrait, notamment parce qu'il n'est pas directement possible de percevoir une durée. La modalité sensorielle la plus précise pour estimer l'espace ou la numérosité est la vision, mais il n'y a pas d'organe dédié à la perception du temps (Loeffler, Cañal-Bruland, Schroeger, Tolentino-Castro & Raab, 2018). La taille d'un objet peut être estimée sur la base d'informations visuelles, même si l'apparition de l'objet en question est brève. Quelques millisecondes sont suffisantes pour extraire les informations spatiales et

générer une estimation automatique, qui, si besoin, sera actualisée avant que l'objet ne disparaisse afin de préciser le percept. Il en est de même pour estimer le nombre d'items dans un nuage de points, les items sont visuellement disponibles pendant l'estimation. Contrairement à l'espace ou à la numérosité, l'estimation du temps est plus délicate dans le sens où les informations utilisées pour estimer la durée d'un événement sont par définition insaisissables a posteriori. Les informations ne sont pas disponibles, le temps s'écoule sans marche arrière possible. Le temps est donc spécial, différent et demande des ressources attentionnelles et mnésiques pour être correctement estimé. Des recherches ont montré qu'en dessous de deux secondes, les durées étaient généralement surestimées, et qu'au-dessus de trois secondes elles étaient généralement sous-estimées (Fraisse, 1946, 1948 ; Vierordt, 1868). Selon Fraisse, les durées de moins de deux secondes seraient plutôt traitées par des processus attentionnels, tandis que les durées de plus de trois secondes seraient plutôt traitées par des processus mnésiques (Fraisse, 1967). Les durées étudiées dans le domaine des magnitudes, et donc dans ce travail de recherche, sont de l'ordre des millisecondes jusqu'à quelques secondes, puisque les durées plus longues (minutes, jours, semaines etc...) impliquent des mécanismes différents, qui sollicitent moins de processus attentionnels et de mémoire de travail, mais plus de processus liés à la mémoire à long terme (Matthews & Meck, 2016 ; Meck, 2005).

Un grand nombre d'études suggèrent que les performances d'estimation du temps d'un grand nombre d'espèces animales s'apparentent aux performances humaines (Church et Deluty, 1977 ; Onoe et al., 2001 ; Wearden, 1991a, 1991b, 1992). Ce constat a amené les chercheurs à considérer que le système cognitif nous permettant de "compter approximativement" le temps serait issu d'un long héritage phylogénétique et serait finalement assez proche des systèmes existants chez l'animal. Parmi les théories les plus anciennes et les plus admises, le modèle de l'horloge interne (Treisman, 1963) fait consensus dans la littérature. Autrefois, cette théorie proposait l'existence d'une sorte de pacemaker relié

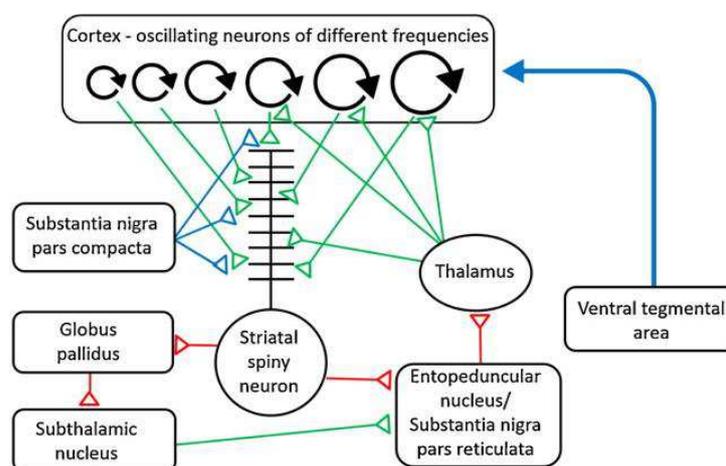
à un interrupteur puis à un accumulateur, émettant ainsi une information de manière régulière (voir Figure 4). Ce pacemaker et cet interrupteur seraient ensuite rattachés à notre mémoire de travail où serait stocké le nombre d'informations émis par le pacemaker, pour ensuite finir par passer par des processus décisionnels (Gibbon et al., 1984 ; Gibbon, 1977). L'idée est que le pacemaker émet des signaux avec une certaine fréquence, et que lors d'une estimation temporelle, une fermeture intentionnelle de l'interrupteur (attention) serait effectuée afin de laisser passer ses signaux, pour qu'ils finissent leur course dans un accumulateur, jusqu'à la fin de l'estimation (marquée par la réouverture de l'interrupteur), suivi par la prise de décision.



**Figure 4.** Représentation schématique du modèle de l'horloge interne selon Gibbon et al. (1984).

De nos jours, le modèle dominant sur cette thématique est le modèle de la fréquence des battements striataux (*SBF* ; Matell & Meck, 2000, 2004). Selon ce modèle, des oscillateurs corticaux seraient impliqués dans la production d'informations temporelles. L'idée du pacemaker serait ainsi abandonnée au profit de ces oscillateurs (voir Figure 5). Ce modèle

neurophysiologique part du principe que notre estimation du temps est possible grâce à des oscillations corticales, dont les informations se propageraient dans une boucle cortico-thalamo-striatal avec les ganglions de la base (Coull, Cheng, & Meck, 2011 ; Coull & Nobre, 2008 ; Muller & Nobre, 2014).



**Figure 5.** Représentation schématique du modèle de la fréquence des battements striataux (Gu, van Rijn & Meck, 2015 ; Matell & Meck, 2000, 2004).

Des recherches ont par ailleurs mis en évidence qu'à l'instar de la numérosité et de l'espace, le traitement du temps provoque lui aussi des activations du sillon intrapariétal (Coull, Vidal, Nazarian, & Macar, 2004 ; Pouthas et al., 2005 ; Walsh & Pascual-Leone, 2003). Cependant, il semblerait que cette zone ne soit pas centrale pour le traitement du temps (Dormal, Andres, & Pesenti, 2008), mais que les zones liées au modèle de l'horloge interne seraient, elles, prépondérantes, tout en étant reliées à d'autres processus cognitifs (Coull & Droit-Volet, 2018 ; Matthews & Meck, 2016).

## 1.2 Les modèles théoriques du système commun du traitement des magnitudes

Suite à cette revue de littérature sur chacune des principales magnitudes, nous allons maintenant présenter les deux grandes théories considérant l'existence d'un système commun

du traitement des magnitudes, et qui tentent de décrire la façon dont serait organisé et comment fonctionnerait ce système de traitement des magnitudes.

### ***1.2.1 La théorie AToM ("A Theory of Magnitude")***

Cette théorie proposée par Walsh en 2003 fait suite à plusieurs constats mettant en relation le temps, l'espace et la numérosité. Tout d'abord, des auteurs soulignent le fait que les zones cérébrales activées lors d'une estimation de magnitude sont souvent similaires (Cona, Wiener & Scarpazza, 2021). Des études sur des patients cérébrolésés, ou utilisant de l'imagerie cérébrale ou de la TMS, ont en effet permis d'aiguiller sur les différentes zones impliquées dans l'estimation des magnitudes.

Il a ainsi été montré que le cortex pariétal joue un rôle dans l'estimation de la numérosité chez les personnes cérébrolésés (Dehaene & Cohen, 1997 ; Henschen, 1919 ; Takayama et al., 1994), que ce soit dans l'hémisphère droit ou gauche (Ashkenazi, Henik, Ifergane & Shelef, 2008 ; Cipolotti, Butterworth & Denes, 1991 ; Lemer, Dehaene, Spelke & Cohen, 2003 ; Polk, Reed, Keenan, Hogarth & Anderson, 2001 ; Warrington & James, 1967). Les résultats de ses études ayant recours à l'imagerie cérébrale sont par ailleurs confortés par les données sur les personnes cérébrolésés : les régions pariétales, notamment les sillons intrapariétaux gauche et droit, sont manifestement activés lors d'une estimation de numérosité (Cantlon, Brannon, Carter & Pelphrey, 2006 ; Castelli, Glaser & Butterworth, 2006 ; Dormal & Pesenti, 2013 ; Fias et al., 2003 ; Pesenti et al., 2000 ; Piazza, Mechelli, Price & Butterworth, 2006), en sachant que ces mêmes zones ont été identifiées comme étant à l'origine d'une altération d'estimation de numérosité lorsqu'elles étaient inhibées par une stimulation transcrânienne (Cappelletti et al., 2007 ; Dormal, Andres, & Pesenti, 2012 ; Sandrini & Rusconi, 2009).

En ce qui concerne l'estimation de l'espace, des résultats similaires ont été obtenus. Des patients ayant des lésions pariétales droites semblent biaisés lors des tâches de

comparaison et de bissection de distances (Bisiach & Luzzatti, 1978 ; Harvey, Milner & Roberts, 1995 ; Irving-Bell, Small & Cowey, 1999 ; Marshall & Halligan, 1989 ; Milner & Harvey, 1995). Les études en imagerie cérébrale montrent que l'estimation de distance implique l'activation du cortex préfrontal, du cervelet, du cortex pariétal, notamment le cortex pariétal droit (Fink et al., 2000 ; Fink, Marshall, Weiss & Zilles, 2001 ; Pinel et al., 2004), et au niveau du sillon intrapariétal (Bjoertomt, Cowey, & Walsh, 2002 ; Dormal, Andres, et al., 2012). Enfin, comme évoqué précédemment, les études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne montrent également l'activation du sillon intrapariétal (Bjoertomt, Cowey, & Walsh, 2002 ; Dormal, Andres, et al., 2012), du cortex pariétal postérieur (Göbel, Calabria, Farne, & Rossetti, 2006) et du cortex pariétal droit lorsque nous estimons une distance (Bjoertomt, Cowey & Walsh, 2002 ; Fierro et al., 2000 ; Fierro, Brighina, Piazza, Oliveri & Bisiach, 2001).

Sur le plan neuronal, le traitement du temps semble un peu plus distribué. Des études chez des patients atteints de la maladie de Parkinson avaient une capacité à estimer le temps altérée (Artieda, Pastor, Lacruz & Obeso, 1992 ; Harrington, Haaland & Hermanowicz, 1998 ; Malapani et al., 1998 ; Malapani, Deweer & Gibbon, 2002 ; Merchant, Luciana, Hooper, Majestic & Tuite, 2008 ; Pouthas & Perbal, 2004), indiquant que le cervelet et les ganglions de la base jouaient un rôle dans l'estimation du temps. L'imagerie cérébrale a permis de montrer que le traitement du temps s'appuie en fait sur un réseau neuronal assez vaste et distribué. Les ganglions de la base, le cortex frontal, le cortex pariétal, l'aire motrice supplémentaire, le cervelet, et les régions prémotrices seraient impliquées lors de l'estimation d'une durée (Belin et al., 2002 ; Coull et al., 2004 ; Ferrandez et al., 2003 ; Pouthas et al., 2005 ; Rao, Mayer & Harrington, 2001). Aussi, comme évoqué précédemment, bien que le sillon intrapariétal soit lui aussi impliqué (Coull, Cheng, & Meck, 2011 ; Coull & Nobre, 2008 ; Muller & Nobre, 2014), son rôle semblerait plutôt mineur (Dormal, Andres, & Pesenti, 2008). On notera que de

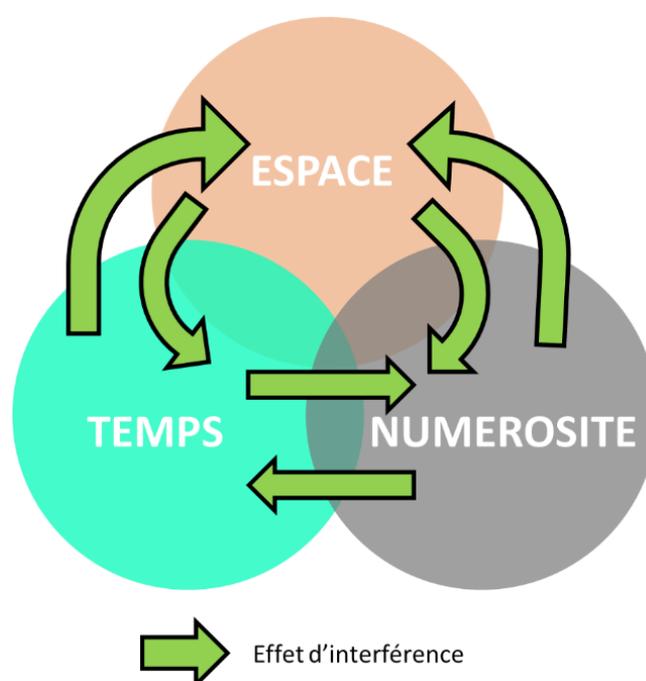
manière générale l'hémisphère droit est plus impliqué que le gauche. L'utilisation de la stimulation transcrânienne corrobore les résultats d'imagerie cérébrale, soutenant l'existence d'une implication du cortex pariétal droit (Alexander, Cowey & Walsh, 2005 ; Bueti, Bahrami & Walsh, 2008), du cortex préfrontal droit (Jones et al., 2004 ; Koch et al., 2003), du cervelet (Koch et al., 2007 ; Lee et al., 2007) et du sillon intrapariétal (Walsh & Pascual-Leone, 2003). L'observation de zones communes d'activations entre les différentes magnitudes (bien que le cortex pariétal et le sillon intrapariétal soient visiblement moins importants pour l'estimation du temps) est un élément majeur laissant penser qu'il existe un système commun au traitement des magnitudes.

Confortant ces observations quant aux zones cérébrales impliquées dans les estimations, on observe également des similitudes vis-à-vis des signatures comportementales. Premièrement, les magnitudes sont assujetties à "l'effet de distance" (plus les deux stimuli à comparer sont de grandeur différente mieux ils sont discriminés) et à "l'effet de taille" (plus on augmente la taille des deux stimuli à comparer, sans pour autant changer l'écart entre les deux, plus il est difficile de les discriminer). Ces effets illustrent la loi de Weber. Cette loi concerne notre capacité à percevoir un changement d'intensité ou de taille d'une magnitude dont l'intensité/taille varie. Selon cette loi, le seuil minimal nécessaire de changement d'intensité/taille d'une magnitude pour que l'on puisse percevoir une différence entre "l'avant" et "l'après" variation du stimulus, correspond à une proportion de l'intensité/taille initiale du stimulus. La valeur de cette proportion constante dépend de la tâche, de la magnitude et du participant (Cohen Kadosh et al., 2005 ; Droit-Volet, Tourret & Wearden, 2004 ; Fias et al., 2003 ; Henmon, 1906 ; Pinel, Piazza, Le Bihan & Dehaene, 2004).

Un deuxième argument comportemental est qu'il semble que l'effet de distance est de moins en moins important avec l'avancée en âge (Holloway & Ansari, 2008), et ce pour l'espace, la numérosité comme pour la luminance (à notre connaissance, il n'y a pas d'étude

sur l'évolution de l'effet de distance pour le temps au cours du développement). De plus, des études ont montré que tout comme un enfant de 6 mois peut discriminer une différence de numérosité si le ratio est d'au moins 1/2 et d'au moins 2/3 à 10 mois (Xu & Spelke, 2000), les performances de comparaison des autres magnitudes suivent une évolution similaire (Brannon, Lutz & Cordes, 2006 ; Brannon, Suanda & Libertus, 2007 ; Lipton & Spelke, 2003 ; van Marle & Wynn, 2006).

Toutes ces similitudes ont amené à s'intéresser aux liens possibles entre les différentes magnitudes et, dans cette perspective, à étudier les effets d'interférence existant entre elles. Un effet d'interférence se caractérise par le fait que lorsque l'on doit estimer une magnitude, notre jugement est biaisé par une autre magnitude non-pertinente (à laquelle on ne doit pas prêter attention). C'est après avoir constaté l'existence d'effets d'interférence entre les magnitudes (voir chapitre 2) que Walsh (2003) a proposé la théorie AToM (A Theory of Magnitude ; Walsh, 2003).



**Figure 6.** Représentation schématique du système commun du traitement des magnitudes selon la théorie AToM (Walsh, 2003)

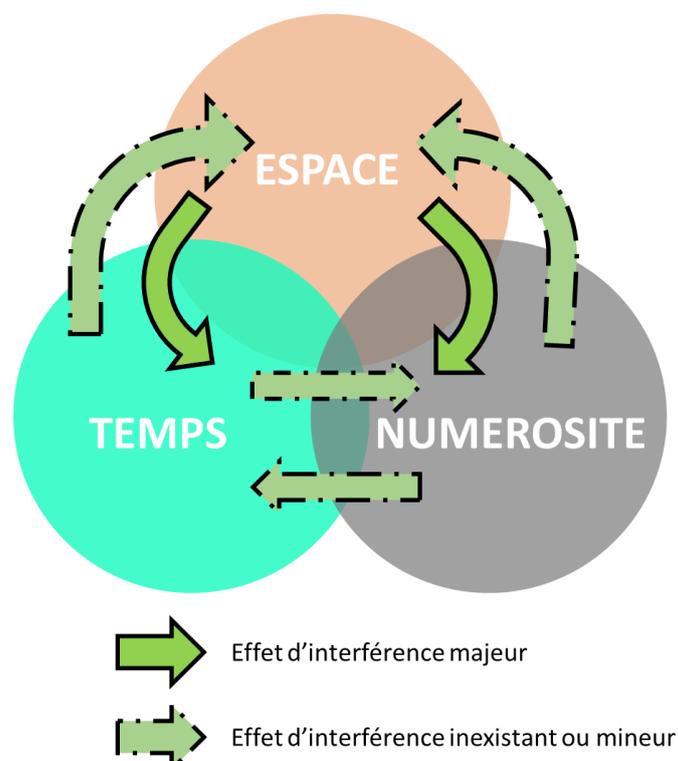
Selon cette théorie, les magnitudes seraient toutes traitées par un système commun. Celui-ci se manifesterait, entre autres, par l'activation de zones communes dans le cerveau (notamment les sillons intrapariétaux) et par l'apparition d'effets d'interférence entre les magnitudes. Chaque magnitude serait donc susceptible de biaiser l'estimation d'une autre magnitude, de manière positivement corrélée (plus la magnitude non-pertinente est importante, plus la magnitude pertinente à estimer est surestimée), de manière réciproque (une magnitude non-pertinente pourrait influencer l'estimation d'une autre magnitude "pertinente", qui elle-même, pourrait influencer l'estimation de l'autre magnitude si les rôles étaient inversés), et de manière symétrique (deux effets d'interaction réciproques seraient censés être de même intensité, sans qu'une des deux magnitudes influence l'autre de façon plus importante qu'elle n'est elle-même influencée par cette autre magnitude : voir Figure 6). L'intérêt de ce système commun serait de simplifier le traitement des différentes magnitudes et donc permettre une facilitation de la gestion de nos actions vis-à-vis de notre environnement (Buetti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003). Plusieurs études ont d'ailleurs mis en évidence une relation magnitude-action (Badets, Andres, Di Luca & Pesenti 2007 ; Ishihara et al., 2008 ; Lindemann et al., 2007 ; Moretto & Di Pellegrino, 2008), en montrant par exemple que percevoir des petites magnitudes facilitait la "préhension avec précision" (nécessaire pour prendre des petits objets) et que percevoir des grandes magnitudes facilitait la "préhension avec force" (pour prendre des grands ou lourds objets). Il a aussi été montré que l'utilisation d'un outil pour traiter des opérations numériques pouvait entraîner une sous-estimation du temps (Virgo, Pillon, Navarro, Reynaud & Osiurak, 2017). Le système commun du traitement des magnitudes permettrait de faciliter le traitement des magnitudes dans le but d'effectuer une action (Walsh, 2003).

### **1.2.2 La théorie de la métaphore conceptuelle (CMT)**

La théorie de la métaphore conceptuelle (CMT) est à l'origine une théorie formulée en psycholinguistique (Lakoff & Johnson, 1980, 1999), expliquant que l'on utiliserait toujours des concepts semblant réels, concrets, pour se représenter et décrire les concepts plus abstraits. Par exemple, la vie serait souvent décrite avec l'utilisation de métaphores se référant au voyage, ou à une balade ; "Elle a pris un nouveau départ dans sa vie" "Depuis qu'elle le connaît, sa vie est une impasse" "Ça ne mène nulle part de vivre comme cela" "Il est arrivé en fin de vie". D'ailleurs, selon cette théorie, le temps est très fréquemment décrit avec des métaphores faisant référence à l'espace, alors que l'espace ne serait que rarement décrit métaphoriquement avec des concepts temporels, et cela quelle que soit notre langue. Nous utiliserions donc l'espace, une magnitude concrète, facile d'accès pour la cognition, afin de décrire le temps, qui lui est plus abstrait car on ne le voit pas directement, et qu'il est plus difficile de se le représenter (Alverson, 1994 ; Boroditsky & Gaby, 2010 ; Clark, 1973 ; Evans, 2004 ; Haspelmath, 1997 ; Traugott, 1978). De plus, selon cette théorie, un phénomène similaire existe entre l'espace et la numérosité ; l'espace serait souvent utilisé comme métaphore pour parler de numérosité, alors la numérosité ne serait que rarement employée comme métaphore pour parler d'espace (Lakoff & Núñez, 2000).

La théorie de la métaphore conceptuelle a suscité un intérêt important chez les chercheurs sur les magnitudes en ce qu'elle s'accordait avec le constat selon lequel les effets d'interférences ne semblaient pas être symétriques. Aucune étude ne semblait montrer l'existence d'un effet du temps sur les estimations spatiales, contrairement à ce que prédisait la théorie AToM. Sur la base de ce constat, des études testant cette asymétrie sont venues montrer que si l'espace pouvait facilement interférer sur nos estimations temporelles, le temps n'avait quant à lui aucun impact sur nos estimations de distances (Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al.,

2010). Par ailleurs, il semblerait que nous nous baserions aussi sur l'espace pour traiter la numérosité (Leibovich et al., 2017). Les débats dans la littérature tournent généralement autour des relations temps-espace et numérosité-espace, donnant toujours à l'espace un rôle central dans les discussions sur le traitement des magnitudes. Ainsi, selon la CMT, l'espace jouerait un rôle prépondérant dans le système de traitement des magnitudes (voir Figure 7). L'espace influencerait nos estimations de temps et de numérosité, tandis que le temps et la numérosité ne s'influenceraient pas entre elles, et n'auraient pas non plus d'impact sur nos estimations spatiales.



**Figure 7.** Représentation schématique du système de traitement des magnitudes selon la théorie CMT (Lakoff & Johnson, 1980, 1999)

Dans le prochain chapitre, nous discuterons plus en détail des effets d'interférence entre les magnitudes, et nous discuterons du modèle qui semble, pour le moment, être le plus pertinent au regard des résultats actuels dans ce domaine.

# Chapitre 2 : Les effets d'interférence entre les magnitudes

Fréquemment, voire constamment, nos décisions et jugements sont influencés, que ce soit par notre environnement, notre état psychologique et émotionnel, et par les caractéristiques du stimulus. Ainsi, nos pensées, nos choix, nos jugements sont par définition colorés par des informations a priori non-pertinentes pour résoudre la tâche en cours. Nous sommes systématiquement sujets à des interférences, impactant notre perception et nos choix. Une fois mis en lumière, ces effets d'interférence nous permettent de mieux comprendre le fonctionnement de la cognition humaine, d'émettre des théories et des modèles afin d'éclaircir l'organisation des différents processus cognitifs. Dans le domaine de l'estimation de magnitude, de nombreux effets d'interférence ont ainsi été mis en évidence. Chacune des trois principales magnitudes (espace, temps et numérosité) semble interférer avec les estimations des autres magnitudes. Les modèles théoriques décrivant la perception des magnitudes se sont largement appuyés sur ces effets d'interférence pour façonner et justifier la hiérarchisation des magnitudes entre elles. Selon ces modèles théoriques, les effets d'interférence entre les magnitudes seraient issus d'un système commun du traitement des magnitudes.

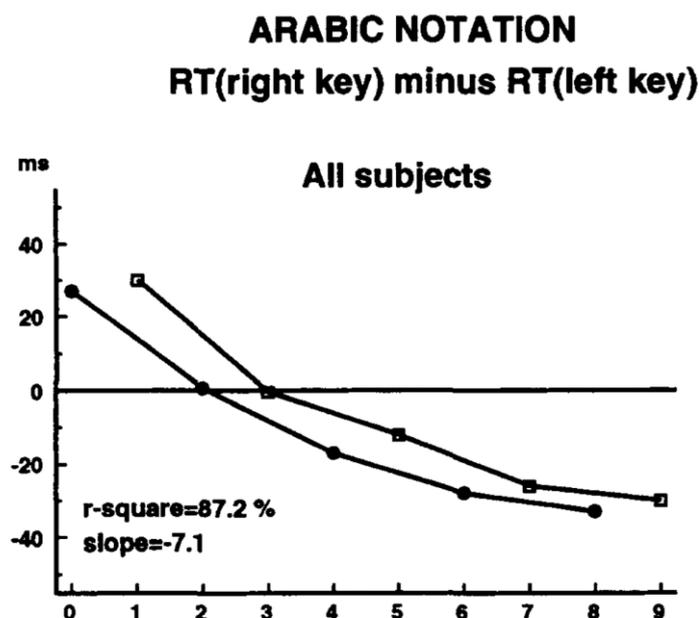
## 2.1 L'espace et la numérosité

Il existe de nombreuses études démontrant un lien étroit entre notre capacité à concevoir l'espace et la numérosité. Chez les patients ayant subi des dommages au cerveau, un amoindrissement des capacités de calcul est ainsi souvent associé à un désordre spatial (Hartje, 1987). Les patients atteints d'héminégligence, suite à un accident cérébral dans l'hémisphère droit (et qui ignorent le côté gauche de l'espace) ont des difficultés lorsqu'ils doivent

déterminer le milieu d'un segment, et des difficultés similaires lorsqu'ils doivent déterminer le milieu entre deux nombres (Zorzi, Priftis, & Umiltà, 2002). Ils ont tendance à surestimer le milieu (par exemple, le milieu entre 2 et 6 est estimé à 5), car ils ignorent le côté gauche dans lequel sont censés se situer les nombres plus petits selon la théorie de la ligne numérique mentale, qui suppose que l'on organise spatialement les petits chiffres vers la gauche et les grands chiffres vers la droite (Dehaene et al., 1993 ; Dormal & Pesenti, 2007). Par ailleurs, l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) afin de perturber temporairement le cortex pariétal influence la capacité des participants à estimer l'espace comme à estimer la numérosité (Göbel, Walsh, & Rushworth, 2001 ; Bjoertomt, Cowey, & Walsh, 2002 ; pour une revue de questions, Hubbard et al., 2005).

Il existe plusieurs effets d'interférence qui lient numérosité et espace. L'un des plus robustes est l'effet de la taille congruente. Cet effet repose sur une dimension particulière de la cognition spatiale, la perception de la taille physique. Dans une étude les participants devaient réaliser une tâche de comparaison de grandeurs portant sur la numérosité de chiffres arabes (i.e. 3 vs. 7). La taille physique des stimuli y était manipulée de manière orthogonale, pour donner lieu à des situations congruentes (i.e. 3 vs. 7), mais aussi incongruentes (i.e. 3 vs. 7). L'effet de la taille congruente se caractérise par une augmentation du temps de réaction lorsque la taille physique et la taille numérique sont incongruentes : petit chiffre affiché en grande taille, ou grand chiffre affiché en petite taille, par rapport à une situation congruente : petit chiffre affiché en petite taille, ou grand chiffre affiché en grande taille (Cohen Kadosh & Henik, 2006 ; Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Linden, et al., 2007 ; Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Schuhmann, et al., 2007 ; Girelli et al., 2000 ; Henik & Tzelgov, 1982 ; Pinel et al., 2004 ; Schwarz & Heinze, 1998 ; Schwarz & Ischebeck, 2003 ; Tzelgov et al., 1992).

Parallèlement, le nombre montre aussi un lien étroit avec une autre dimension de l'espace que l'on définit comme de la localisation spatiale ou de la spatialisation. Ce lien s'exprime dans un des effets les plus célèbres dans l'étude de la perception des magnitudes et de la cognition numérique en psychologie : l'effet SNARC (*Spatial Numerical Association of Response Code*). Ce phénomène se caractérise par la facilitation de répondre avec une de nos deux mains en appuyant sur une touche, en fonction de la taille numérique d'un nombre affiché sur un écran. En 1993, Dehaene et al. ont démontré l'existence de l'effet SNARC en mettant en place une série d'expériences autour d'un paradigme simple. Ces auteurs présentent des chiffres aux participants, qui doivent déterminer s'ils sont pairs ou impairs. Pour répondre, le participant doit appuyer sur un bouton avec l'une de ses deux mains (une main est associée à la réponse "pair" et l'autre à la réponse "impair", et inversement une fois arrivé à la moitié de l'expérience). Les résultats montrent que lorsque le chiffre affiché est plutôt "petit" (de 0 à 4), les participants sont plus rapides pour catégoriser le chiffre quand ils doivent le faire avec la main gauche que lorsqu'ils doivent le faire avec la main droite. Lorsque le chiffre affiché est plutôt "grand" (de 6 à 9) le constat est inverse, les participants sont plus rapides pour catégoriser le chiffre quand ils doivent répondre avec la main droite que lorsqu'ils doivent répondre avec la main gauche (voir Figure 8).



**Figure 8.** Représentation graphique de la différence de temps de réaction entre la main gauche et la main droite ( $RT_{\text{droite}} - RT_{\text{gauche}}$ ) pour chaque catégorisation de chiffre (une différence positive signifie que les participants sont plus rapides avec la main gauche qu'avec la main droite, et inversement pour une différence négative) (Dehaene et al., 1993).

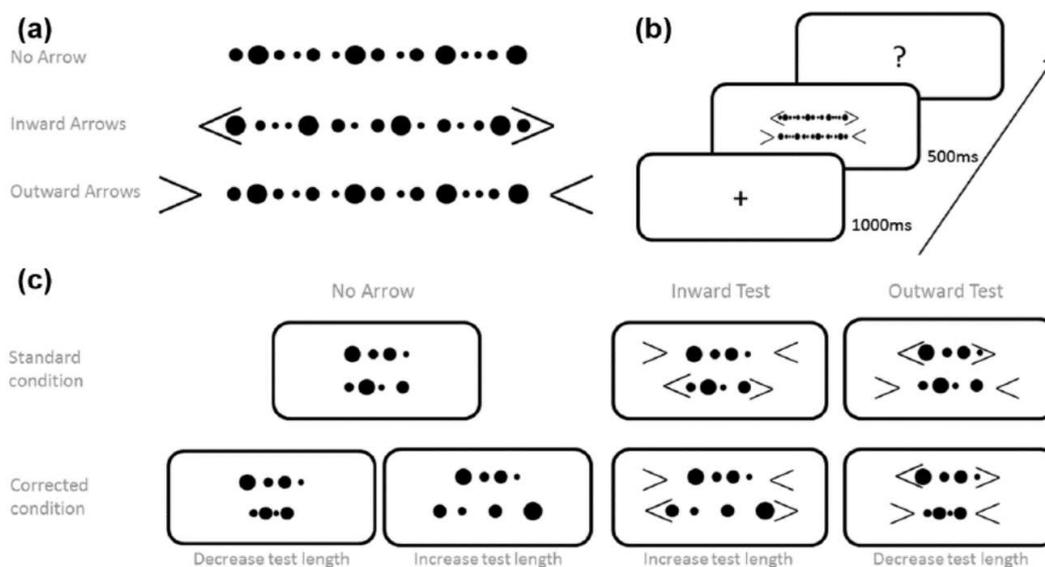
À noter que l'effet SNARC n'est pas lié à la main qui sert à répondre, mais directement au côté de l'espace où se situe la touche-réponse. En croisant les mains (main droite pour appuyer à gauche, et main gauche pour appuyer à droite), face à de petits chiffres les temps restent plus rapides pour appuyer sur le bouton de gauche (donc avec la main droite) que pour appuyer sur le bouton de droite. De même les temps restent plus courts face à des grands chiffres avec le bouton de droite. On peut néanmoins noter que l'effet SNARC est atténué, voire inversé, chez les participants dont le sens de lecture/écriture de leur langue natale est de droite à gauche (Dehaene et al., 1993), et lorsque les participants sont soumis à un apprentissage sensorimoteur préalable (Badets, Boutin & Heuer, 2015).

Bien que l'effet SNARC ne soit pas considéré comme un effet d'interférence direct entre espace et numérosité, il a tout de même joué un rôle important dans l'histoire de la modélisation du système de traitement des magnitudes. La représentation mentale et spatiale de la

numérosité met en évidence un phénomène déjà bien étudié à l'époque, qu'est la spatialisation des informations. L'interprétation théorique la plus défendue est celle de la ligne numérique mentale qui permettrait d'organiser les informations dans l'espace (Dehaene et al., 1993 ; Dormal & Pesenti, 2007). De nombreuses études ont ainsi démontré que penser et se représenter les nombres se manifeste par une spatialisation des informations par ordre croissant de la gauche vers la droite sur une ligne mentale. L'existence de l'effet SNARC (qui est un effet impliquant la numérosité et l'espace) renforce fortement la pertinence de la théorie de cette ligne numérique mentale représentant la hiérarchisation de la numérosité en fonction de l'espace.

Outre l'effet SNARC, il existe des études qui mettent en évidence des effets d'interférence entre numérosité et espace. Néanmoins, il est à souligner que l'espace semble être prépondérant dans ces effets. Ainsi, dans l'écrasante majorité des études, l'espace influence les estimations de numérosité, mais la numérosité n'influence pas ou que très peu les estimations spatiales (Dormal & Pesenti, 2007 ; Hurewitz, Gelman & Schnitzer, 2006). Une expérience récente a d'ailleurs montré que l'effet de l'espace sur l'estimation de numérosité pouvait même être montré en ayant recours à une illusion d'option, sans même faire objectivement varier la dimension spatiale du stimulus. Dormal, Larigaldie, Lefèvre, Pesenti, & Andres (2018) ont ainsi mené une étude dont le paradigme principal repose sur une tâche de comparaison de multiples points alignés horizontalement (entre 11 et 19 par groupe de points) et encadrés (ou non) par des symboles (> et <, ou < et >). Les participants voyaient 2 lignes de points pendant 500 ms, une en haut et une en bas de l'écran, et devaient dire si celle du bas contenait plus ou moins de points que celle du haut. Les segments des symboles qui encadrent les lignes de points sont soit dirigés vers l'intérieur (<exemple>), soit vers l'extérieur (>exemple<). Si la ligne du haut a les segments vers l'extérieur alors la ligne du bas aura les segments qui pointent vers l'intérieur. Les symboles placés aux extrémités des deux lignes de

points permettent ainsi de reproduire l'illusion de Müller-Lyer (1889). Cette illusion produit une tendance à sous-estimer la longueur d'une ligne encadrée par des segments pointant vers l'intérieur, et une tendance à surestimer la longueur d'une ligne encadrée par des segments pointant vers l'extérieur (voir Figure 2.A et Figure 9).

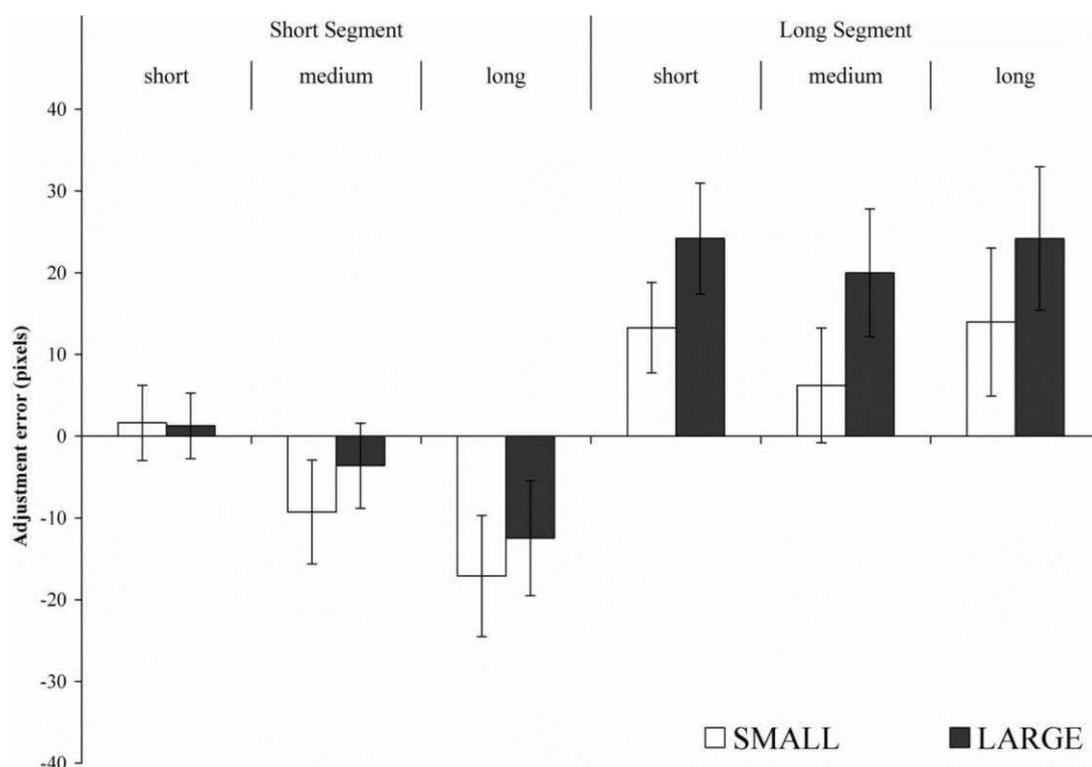


**Figure 9.** (a) Exemples de lignes de points de même longueur et composées de 15 points soit sans symboles, avec des symboles dont les segments pointent vers l'extérieur, ou vers l'intérieur. (b) Schéma chronologique d'un essai. (c) Exemples de stimuli. (Dormal, Larigaldie, Lefèvre, Pesenti, & Andres, 2018)

Les résultats montrent qu'au-delà des variations réelles de changement de la taille horizontale des lignes de points (distance entre l'extrémité gauche et l'extrémité droite des lignes de points), l'illusion provoquée par les symboles influence les estimations de numérosité des participants. En d'autres termes, si les deux lignes de points contiennent le même nombre de points répartie sur une distance identique, alors la ligne ayant à ses extrémités des symboles dont les segments pointent vers l'extérieur sera surestimée car considérée comme contenant plus de points que la ligne ayant à ses extrémités des symboles dont les segments pointent vers l'intérieur (qui elle, sera donc sous-estimé). Ainsi, cette expérience démontre qu'une simple

variation de la perception subjective de la caractéristique spatiale d'un stimulus influence l'estimation de la numérosité de ce stimulus.

Parmi les rares études mettant en évidence un effet de la numérosité sur notre estimation spatiale, celle de De Hevia, Girelli, Bricolo, & Vallar (2008) en est un parfait exemple car elle montre que l'affichage de petits chiffres provoquera une sous-estimation de l'espace, et que l'affichage de grands chiffres provoquera une surestimation de l'espace. Dans une de leurs expériences, les chercheurs ont fait faire aux participants une double tâche. Chaque essai était composé de 5 images. Se succédaient une croix de fixation pendant 500 ms, un écran vide pendant 200 ms, puis deux chiffres identiques apparaissaient durant 1000 ms ("1" et "1", "2" et "2", "8" et "8", ou "9" et "9"). Ces deux stimuli étaient physiquement séparés par une ligne de longueur variable (courte, moyenne ou longue). Ils étaient suivis d'un autre écran vide pendant 200 ms, puis par l'affichage d'une ligne horizontale dont la longueur variait. Suite à cela, les participants devaient dire oralement si les chiffres affichés étaient inférieurs ou supérieurs à 5, puis ils devaient effectuer sur ordinateur une reproduction de la ligne, dont ils devaient ainsi estimer la longueur. Les résultats montrent que globalement, la valeur des chiffres affichés influence l'estimation de la longueur de la ligne horizontale (voir Figure 10).



**Figure 10.** Erreur moyenne (en pixels) de la reproduction de la ligne, en fonction de la grandeur des nombres affichés (petit "1-1" et "2-2" ; grand "8-8" et "9-9"), de la longueur de la distance entre les deux chiffres (court, moyen, long), et de la longueur de la ligne à estimer (courte, longue). Une erreur moyenne négative indique une sous-estimation, tandis qu'une erreur moyenne positive indique une surestimation (De Hevia, Girelli, Bricolo, & Vallar, 2008).

Pour résumer, l'espace et la numérosité semblent indubitablement liés. De nombreuses études utilisant des paradigmes variés mettent en évidence que des mécanismes sont partagés dans le traitement de l'espace et de la numérosité. Néanmoins, si les études sur l'effet d'interférence de l'espace sur l'estimation de numérosité sont très nombreuses dans la littérature, beaucoup moins de recherches portent sur l'effet de la numérosité sur l'espace. A l'heure actuelle, si l'on considère qu'il est pertinent d'impliquer les effets d'interférence dans la modélisation du système de traitement des magnitudes, ce constat corrobore les modèles qui attribuent à l'espace un rôle prépondérant dans les relations numérosité-espace au regard de

l'asymétrie des effets d'interférence (Dormal & Pesenti, 2007 ; Hurewitz, Gelman & Schnitzer, 2006, Leibovitch et al., 2017).

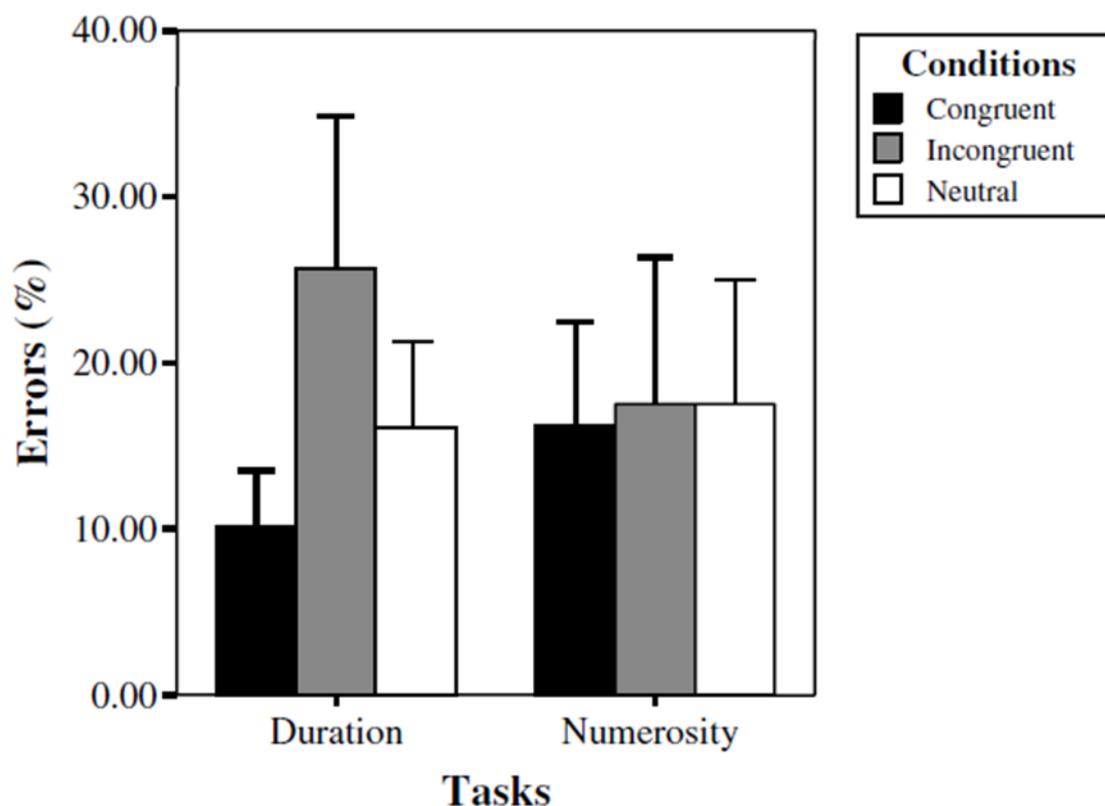
## **2.2 La numérosité et le temps**

La plupart des études mettant en relation la numérosité et le temps sont des recherches basées sur la localisation neuronale des activités cérébrales lorsque nous traitons ces deux magnitudes. En effet, plusieurs zones cérébrales (principalement dans les zones pariétales ; Cortex pariétal inférieur et sillon intrapariétal) semblent communes au traitement de la numérosité (Dehaene, 2002 ; Dehaene & Changeux, 1993 ; Dehaene & Cohen, 1997 ; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003 ; Pesenti, Thioux, Seron, & De Volder, 2000 ; Pinel et al., 1999 ; Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan, & Dehaene, 2002 ; Takayama, Sugishita, Akigushi, & Kimura, 1994) et au traitement du temps (Coull, 2004 ; Lejeune et al., 1997 ; Maquet et al., 1996 ; Schubotz, Friederici, & von Cramon, 2000).

Les effets d'interférences entre ces deux magnitudes ne sont que peu étudiés. Les quelques études portant sur ces effets d'interférence révèlent généralement un effet de la numérosité sur l'estimation temporelle, mais pas d'effet du temps sur les estimations numériques (Droit-Volet, Clément, & Fayol, 2003). Dormal, Seron & Pesenti (2006) ont étudié les interférences numérosité-temps à l'aide d'une tâche de comparaison. Dans leur expérience, un stimulus cible était constitué de l'affichage successif d'un rond au centre de l'écran, qui clignotait de multiples fois pendant un court laps de temps. Durant chaque séquence, le rond apparaissait entre 5 et 9 fois, pendant une durée allant de 1200 ms à 2100 ms. Après une série de deux séquences de présentation d'items visuels, le participant devait comparer les deux séquences en indiquant ; soit quelle séquence avait duré le plus longtemps (dans la tâche temporelle), soit quelle séquence contenait le plus de rond. Les items de l'expérience comportaient trois types de séries différentes, les séries dites "congruentes" dans lesquelles

l'essai ayant une durée courte était aussi celui ayant une petite numérosité (et durée longue = grande numérosité), les séries dites "incongruentes" dans lesquelles l'essai ayant une durée courte était celui ayant une grande quantité (et durée longue = petite numérosité), et des séries "neutres" dans lesquelles la magnitude non-pertinente était fixe (6 ronds pour les deux essais dans la tâche d'estimation du temps, et 1500 ms pour les deux essais dans la tâche d'estimation numérique). Le but des auteurs était de tester l'hypothèse selon laquelle en condition Incongruente, la magnitude pertinente "grande" allez être sous-estimée et la magnitude pertinente "petite" allait être surestimée (à cause de la magnitude non pertinente), comparé à la condition Congruente. Augmenter ainsi la quantité d'erreurs en condition Incongruente, montrerait un effet significatif de la magnitude non pertinente.

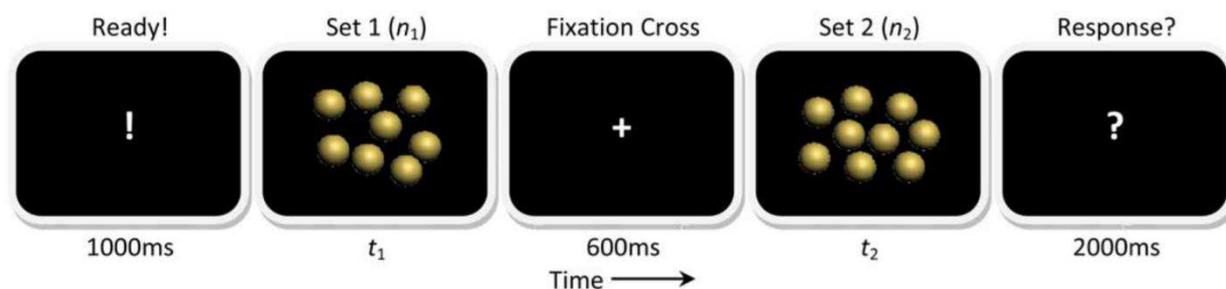
Les résultats de Dormal, Seron & Pesenti (2006) montrent que dans la tâche temporelle, en condition Incongruente les participants ont effectivement beaucoup plus tendance à se tromper qu'en condition Congruente, ce qui va dans le sens de l'existence d'un effet d'interférence de la numérosité sur notre estimation temporelle. Une durée peut donc être biaisée par un nombre d'items, se traduisant par une surestimation du temps de présentation quand le nombre d'items présenté est grand. En revanche, la réciproque n'est visiblement pas vraie. Le nombre d'items présenté ne semble pas influencé par le temps de présentation (voir Figure 11). Quand le temps est non pertinent pour la tâche, il ne semble pas avoir d'influence sur l'estimation de la numérosité d'un ensemble d'éléments (Dormal, Seron & Pesenti, 2006).



**Figure 11.** Pourcentage d'erreur lors de la tâche de comparaison temporelle et de la tâche de comparaison numérique, en fonction de la condition (congruente, incongruente ou neutre) (Dormal, Seron & Pesenti (2006).

Très peu d'études démontrent un effet de la numérosité sur l'estimation temporelle, et encore moins ne mettent en évidence un effet du temps sur l'estimation numérique. La plupart des études ne révèlent pas d'effet significatif du temps sur la numérosité. Étonnamment, les rares études qui observent un effet d'interférence du temps sur la numérosité montrent que la durée serait négativement corrélée avec la numérosité : plus la durée est longue, plus le nombre d'item est sous-estimé. Là où les autres effets d'interférence entre magnitudes sont systématiquement positivement corrélés, l'effet du temps sur la numérosité (quand il atteint un seuil de significativité) est alors négativement corrélé. Une durée courte (une présentation rapide de la numérosité) provoquerait une surestimation de la numérosité, et une durée longue provoquerait une sous-estimation de la numérosité (Lambrechts, Walsh & van Wassenhove,

2013 ; Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017). A notre connaissance, une seule étude rapporterait un effet positivement corrélé du temps sur l'estimation numérique, celle de Javadi & Aichelburg (2012). Cette étude est une étude de comparaison de deux essais, à l'instar de l'étude précédemment détaillée. Cependant, dans le protocole de cette expérience, la numérosité totale est instantanément perceptible, alors qu'il devrait y avoir une accumulation d'informations pour chacune des deux magnitudes, pas seulement pour le temps. Le traitement du temps, contrairement aux autres magnitudes telles que l'espace ou la numérosité, repose intrinsèquement sur des informations séquentielles ou cumulatives. La mémoire de travail est inévitablement impliquée dans des tâches temporelles pour accumuler des informations sensorielles au fil du temps (Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015 ; Coull & Droit-Volet, 2018). La procédure employée est donc sans doute critiquable au regard de la littérature, puisque le paradigme de Javadi & Aichelburg (2012) utilise des essais ne demandant pas d'accumulation de l'information. Outre ce "souci méthodologique", ce paradigme souffre d'une autre difficulté méthodologique sans doute plus problématique, qu'est la taille des ronds affichés (voir Figure 12). Ceux-ci sont tous de taille identique, dès lors il est difficile de déterminer si les participants ont perçu les ronds comme étant de la numérosité (peu de balles vs. beaucoup de balles) ou comme étant de l'espace (petite surface jaune totale vs. grande surface jaune totale) auquel cas l'effet du temps s'apparenterait plutôt à un effet Tau (effet du temps sur l'estimation spatiale).



**Figure 12.** Représentation schématique d'un essai (Javadi & Aichelburg, 2012)

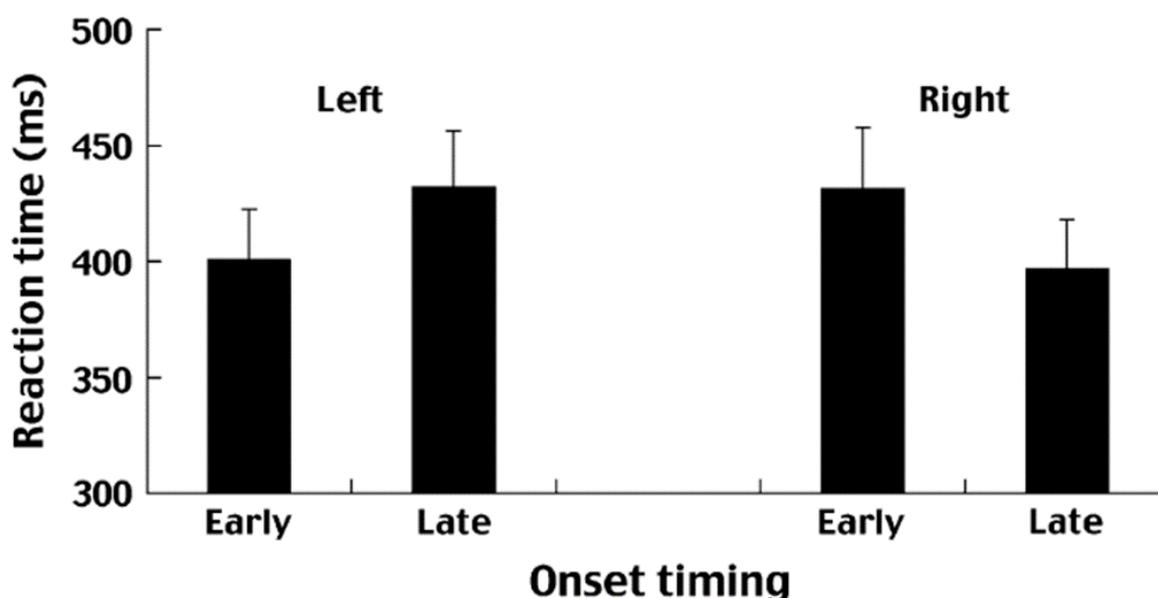
L'un des grands intérêts de l'étude des liens entre numérosité et temps est qu'ils sont difficilement explicables par les modèles actuels du système de traitement des magnitudes. En effet, selon la théorie AToM, il devrait y avoir des effets d'interférence positivement corrélés et réciproques entre le temps et la numérosité, alors que selon la CMT, aucun effet d'interférence ne devrait exister entre ces deux magnitudes. Dans les faits, la numérosité semble pouvoir interférer sur les estimations temporelles, alors que le temps influence la numérosité négativement, ou ne l'influence pas du tout. Ainsi, les effets d'interférence temps-numérosité laissent pour le moment un flou vis-à-vis des hypothèses proposées par les modèles théoriques AToM et CMT.

### 2.3 Le temps et l'espace

A l'instar des relations espace-numérosité et numérosité-temps, des résultats d'imagerie montrent qu'il existe des substrats neuronaux communs participant au traitement de l'espace et du temps (Assmus, Marshall, Noth, Zilles, & Fink, 2005 ; Assmus et al., 2003 ; Oliveri, Koch, & Caltagirone, 2009 ; Parkinson, Liu, & Wheatley, 2014). De plus, des distorsions de la perception du temps ont été constatés chez les patients atteints d'héminégligence (Basso, Nichelli, Frassinetti, & di Pellegrino, 1996 ; Danckert et al., 2007).

Il est intéressant de constater qu'il existe un effet similaire à l'effet SNARC (numérosité-espace) reliant l'espace et le temps, l'effet STEARC (*Spatial-TEmporal*

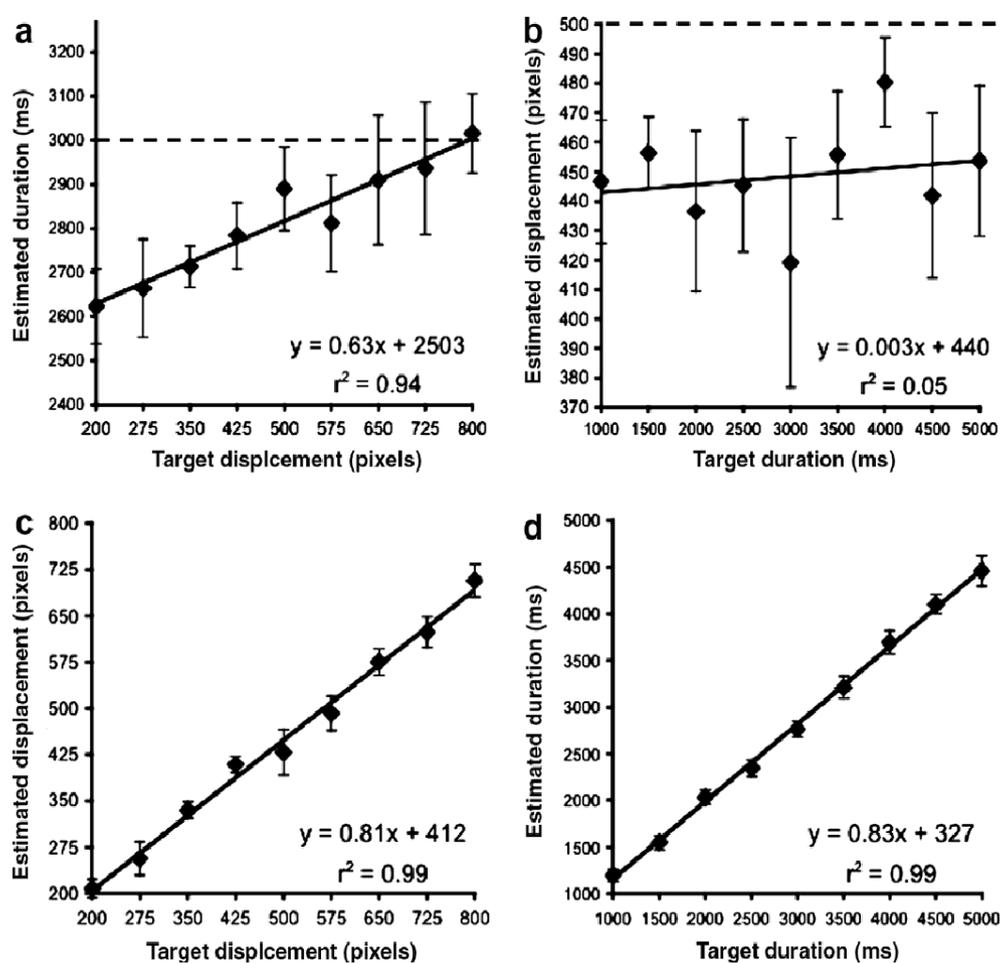
*Association of Response Codes*). Ishihara et al (2007) ont mis en place un protocole expérimental permettant de démontrer l'existence de cet effet. Le paradigme consistait à faire écouter 7 bips sonores aux participants, avec 500 ms d'intervalle entre chaque bip. Après le 7<sup>ème</sup> bip, un 8<sup>ème</sup> bip sonore intervenait soit au bout de 285 ms, soit au bout de 715 ms. Les participants (qui avaient les yeux bandés durant toute la durée de l'expérience), devaient appuyer sur un bouton situé à leur gauche s'ils pensaient que le 8<sup>ème</sup> bip est arrivé plus tôt que prévu (durée courte), et sur le bouton à droite s'ils estimaient que le 8<sup>ème</sup> bip est arrivé plus tard que prévu (durée longue). Cette dernière condition est dite "congruente" car la réponse courte est associée à la partie gauche, et la réponse longue est associée à la partie droite. A la moitié de l'expérience, les touches réponses étaient inversées, ce qui constituait alors la condition incongruente (gauche = longue durée, droite = courte durée). Evidemment, l'ordre des conditions (congruente, incongruente) était contrebalancé selon les participants. Les résultats montrent que les participants sont plus rapides pour répondre en situation congruente qu'en situation incongruente, montrant ainsi que la partie gauche est associée aux durées courtes, et que la partie droite est associée aux durées longues (voir Figure 13).



**Figure 13.** Temps de réaction moyens, en fonction du côté de la réponse et de l'assignation de ces touches réponses, ainsi que de l'arrivée du 8<sup>ème</sup> bip (précoce, ou tardif). (Ishihara et al., 2007)

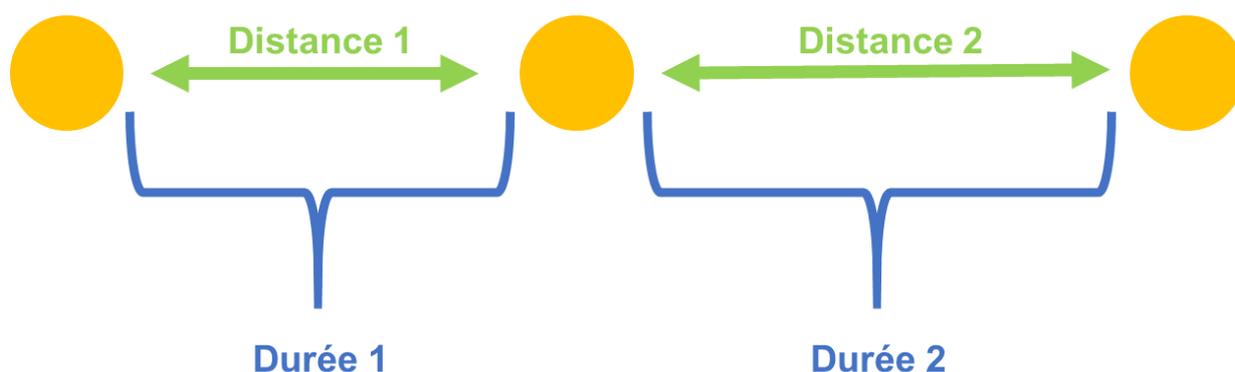
A l'instar de l'effet SNARC, l'effet STEARC ne constitue pas en soi un effet direct d'une magnitude sur l'estimation d'une autre magnitude. Pour ce qui est des effets d'interférence sur l'estimation des magnitudes, l'effet Kappa (effet de l'espace sur l'estimation temporelle) est probablement l'effet d'interférence le plus reproduit et le plus stable. Cet effet d'interférence se caractérise par une influence de la dimension spatiale d'un stimulus sur notre estimation temporelle de ce stimulus. Plus la taille ou la longueur du stimulus est grande, plus nous aurons tendance à surestimer sa durée. L'étude de Casasanto et Boroditsky (2008) a fortement contribué à la popularité de la CMT. Utilisant comme paradigme de base deux tâches de reproduction de magnitude, les participants voyaient apparaître à l'écran, à chaque essai, une ligne qui grandissait progressivement. Les auteurs contrastaient deux tâches. Dans la tâche spatiale, le participant devait reproduire la taille finale de la ligne en cliquant au centre de l'écran une fois l'essai terminé pour faire apparaître une croix, puis en cliquant une deuxième fois à une distance estimée équivalente à la longueur finale de la ligne. Dans la tâche

temporelle, celui-ci devait reproduire la durée totale de présentation du stimulus en cliquant sur un sablier, puis en appuyant à nouveau dessus une fois qu'il estimait que la durée écoulée entre son 1<sup>er</sup> et son 2<sup>eme</sup> clic était équivalente à la durée de présentation de la ligne. Dans les deux tâches, selon les essais, la distance et la durée variaient de manière orthogonale (de 200 à 800 pixels pour la taille de la ligne, et de 1000 ms à 5000 ms pour la durée totale de présentation de la ligne). Les résultats mettent en évidence l'existence d'un effet Kappa : l'estimation de la durée est influencée par la longueur de la ligne (Figure 14.a.).



**Figure 14.** Estimations moyennes de la durée de présentation de la ligne (a & d) et de la taille de la ligne (b & c), en fonction de la durée (b & d) et de la taille (a & c). Ainsi, (a) représente l'effet de l'espace sur l'estimation du temps (effet Kappa), (b) représente l'effet du temps sur l'estimation de l'espace (effet Tau ; ns), (c) représente l'estimation de la taille en fonction de la taille, et (d) représente l'estimation de la durée en fonction de la durée. (Casasanto & Boroditsky, 2008)

A noter cependant, aucun effet significatif de la durée sur l'estimation de la longueur de la ligne n'est reporté (Figure 14.b.). L'effet d'interférence des durées sur nos estimations spatiales, appelé "effet Tau", a pourtant déjà été mis en évidence dans la littérature. L'effet Tau (effet du temps sur nos estimations spatiales) a été démontré pour la première fois en 1931 par Helson & King. Le paradigme utilisé par ces auteurs consistait à afficher successivement trois lumières, l'une après l'autre, et à trois endroits différents. Il était demandé au participant d'estimer si la distance qu'il y avait entre la lumière 1 et la lumière 2 était plus petite, égale, ou plus grande que la distance qui séparait la lumière 2 de la lumière 3. Or, la durée entre l'affichage des lumières variait (voir Figure 15). Ainsi, en plus de la variation de distance entre chaque lumière (distances que le participant devait comparer), les durées entre chaque lumière variaient aussi.



**Figure 15.** Représentation schématique d'un essai (Helson & King, 1931).

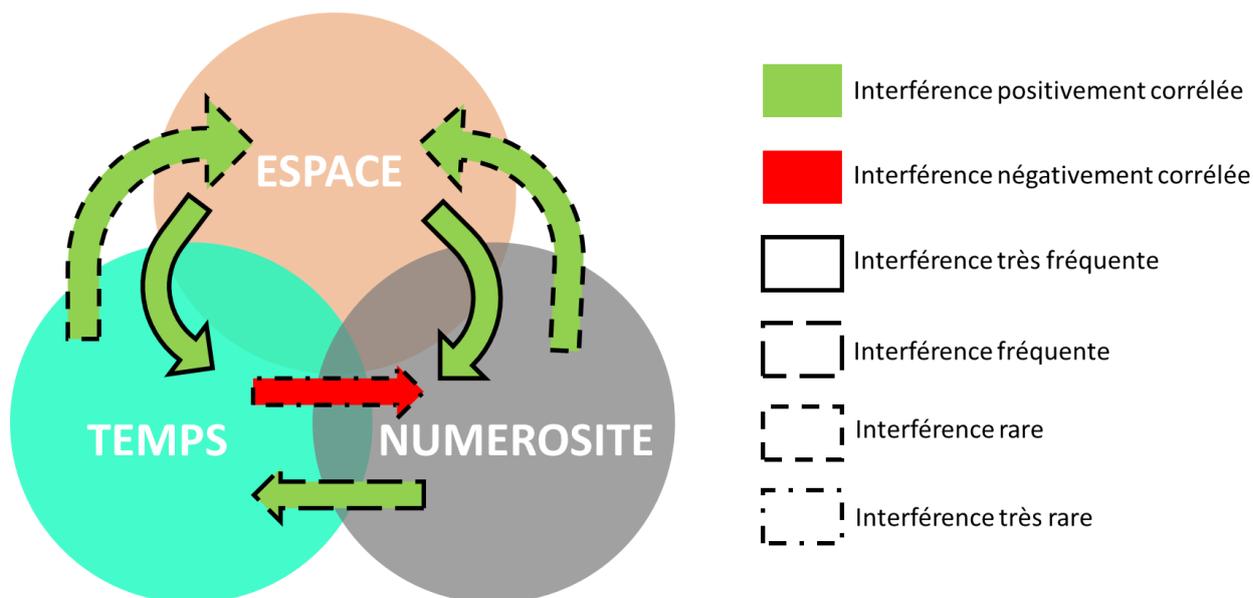
Les résultats obtenus montrent que lorsque la distance 1 est égale à la distance 2, alors le participant sous-estime la distance 2 si la durée 2 est plus courte que la durée 1. Cependant, le participant surestime la distance 2 si la durée 2 est plus longue que la durée 1.

L'effet du temps sur l'estimation spatiale (effet Tau) est très débattu dans la littérature. De nombreuses expériences ont échoué à obtenir un effet Tau significatif, et le peu d'expériences y parvenant, rapportent généralement un effet Tau bien inférieur à l'effet Kappa. Il semble donc exister une asymétrie de l'importance des effets d'interférence espace-temps.

La force de l'effet Kappa est généralement plus importante que la force de l'effet Tau (qui lui, est bien souvent inexistant, voir par exemple Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al., 2010).

## Conclusion

En conclusion, les effets d'interférence semblent ne pas toujours être réciproques, et quand ils le sont, l'importance des effets n'est pas toujours d'envergure égale. En outre, l'espace semble fortement influencer nos estimations de numérosité, alors que nos estimations spatiales ne sont que peu influencées par la numérosité. Le constat est similaire dans la relation temps-espace. L'effet Kappa (effet de l'espace sur nos estimations temporelles) est un effet robuste et facile à répliquer, tandis que l'effet Tau (effet du temps sur nos estimations spatiales) est toujours plus faible voire inexistant. Ces données sont plutôt en accord avec les hypothèses issues la théorie de la métaphore conceptuelle (CMT) qui attribue un rôle prépondérant à l'espace dans le fonctionnement du système commun des magnitudes. Cependant, cette théorie n'explique pas l'origine de l'effet d'interférence, assez robuste, de la numérosité sur nos estimations temporelles. Si on considère qu'il est pertinent d'envisager l'existence des effets d'interférence comme un argument légitime pour défendre un modèle théorique, alors ni la théorie AToM ni la théorie CMT ne sont totalement satisfaisantes. La théorie AToM suppose que les effets d'interférence sont réciproques et d'envergure comparable, or certains effets d'interférence semblent être rarement significatifs aux vues des données expérimentales (voir Figure 16). De plus, l'effet du temps sur la numérosité semble être négativement corrélé, ce qui va à l'encontre de la théorie AToM.



**Figure 16.** Représentation schématique des différents effets d'interférence sur l'estimation des magnitudes en fonction des autres magnitudes.

Les résultats expérimentaux du domaine semblent néanmoins être, à ce jour, davantage compatibles avec la CMT. On constate que les effets d'interférence de l'espace sur les autres magnitudes sont plus importants/fréquents que les effets d'interférence réciproques. Cependant, l'existence de l'effet de la numérosité sur l'estimation temporelle reste à comprendre dans le cadre de la CMT.

## Chapitre 3 : Émotions et magnitudes

### 3.1 Les émotions

Le terme "émotions" renvoie à des états affectifs généralement caractérisés par leur valence, c'est-à-dire leur position sur une dimension caractérisée par un pôle positif et un pôle négatif. Les émotions se distinguent des autres états émotionnels tels que les humeurs ou les tempéraments émotionnels sur plusieurs points. Elles sont généralement plus intenses, apparaissent bien plus rapidement et en réaction à un événement interne ou externe précis, mais durent moins longtemps que l'humeur, par exemple (Rimé, 2009). Lorsqu'une émotion émerge, il se produit des changements physiologiques, qui peuvent être indexés, entre autres, par des variations de l'activité électrodermale (Christopoulos, Uy & Yap, 2016 ; Critchley et al., 2000 ; Gatti, Calzolari, Maggioni & Obrist, 2018 ; Ménard et al., 2015 ; Nakasone, Prendinger & Ishizuka, 2005), des variations du rythme cardiaque (Brosschot & Thayer, 2003 ; Ménard et al., 2015) ou l'apparition d'expressions faciales (Ekman & Oster, 1979) par exemple. Un contexte émotionnel déclenche automatiquement une série de réactions. Des processus automatiques comme l'attention exogène (Carretié, 2014), ou la mémorisation des détails (Heuer & Reisberg, 1992) sont modifiés. Nos ressources attentionnelles sont mobilisées pour analyser l'événement qui a provoqué l'état émotionnel ressenti. Plusieurs courants théoriques font l'hypothèse que les émotions de base sont innées et universelles (Kemper, 1987). Dès la naissance nous serions capables de faire émerger certaines émotions de base. Cette hypothèse s'appuie notamment sur l'observation selon laquelle des nouveau-nés sont capables de sourire, d'être en état de détresse, ou même de sursauter (Charlesworth & Kreutzer, 1973). En psychologie, pendant plusieurs décennies, les émotions ont été catégorisées selon deux approches. La première approche, dite catégorielle, ou discrète, distingue des familles

d'émotions délimitées par des émotions de bases. En 1992, Ekman estime que la colère, le dégoût, la joie, la peur, la surprise et la tristesse constituent les six émotions de base. Selon lui, ces émotions seraient ancrées dans notre code génétique et issues d'un long processus évolutif. Elles auraient contribué à optimiser notre survie, et elles seraient universelles. D'autres chercheurs pensent que la liste des émotions de base est plus exhaustive. Selon Izard (1977) la honte, l'intérêt, le mépris et la culpabilité en feraient également partie. La seconde approche, dite dimensionnelle, catégorise les émotions au regard de leur position sur au moins deux dimensions, la valence et l'arousal (ce dernier terme étant le plus souvent traduit en français par "éveil"). La première dimension, la valence, correspond à la valeur positive ou négative d'une émotion. Les émotions dites "à valence positive" sont des émotions perçues comme agréables, bénéfiques, que l'on aimerait ressentir le plus souvent possible. Plus une émotion est perçue positivement, plus sa valence est évaluée positivement (voir Tableau 1). A l'inverse, les émotions dites "à valence négative" sont des émotions perçues comme désagréables, dérangeantes, et que l'on souhaiterait ressentir le moins souvent possible (voir Tableau 1). A l'instar des émotions positives, plus une émotion est perçue négativement, plus sa valence sera évaluée négativement.

Le second critère de catégorisation des émotions est l'arousal. L'arousal correspond à l'intensité d'excitation, l'éveil, que provoque une émotion, à ne pas confondre avec l'intensité de la valence d'une émotion. L'idée est que plus une émotion provoque une réaction physiologique importante, plus l'émotion est considérée comme ayant un fort arousal. Ainsi, une émotion peut avoir un arousal faible ou fort indépendamment de la valence de celle-ci.

Tableau 1

Classement de quelques émotions, dans un modèle valence-arousal (Wiem & Lachiri, 2017)

	<b>Affective Classes</b>	<b>Discrete Emotion Tagging</b>
<b>Arousal</b>	<i>Clam</i>	Sadness, Disgust, Neutral
	<i>Medium</i>	Happiness(Joy), Amusement
	<i>Activated</i>	Surprise, Fear, Anger, Anxiety
<b>Valence</b>	<i>Unpleasant</i>	Anger, Anxiety, Disgust, Sadness, Fear
	<i>Neutral</i>	Neutral, Surprise
	<i>Pleasant</i>	Happiness(Joy), Amusement

Une émotion est donc une activation automatique de processus complexes, tels que des sensations de plaisir, des sensations neutres, ou de déplaisir (valence positive, neutre ou négative) pouvant s’accompagner d’excitation (arousal faible ou fort), impliquant des processus d’évaluation cognitive des informations internes et externes, ainsi que des manifestations physiologiques mesurables, des changements comportementaux, dont l’objectif est de permettre une adaptation à un contexte particulier (Piolat & Bannour, 2008 ; Rimé, 2009).

## 3.2 L’impact des émotions sur nos capacités cognitives

### 3.2.1 Emotions et attention

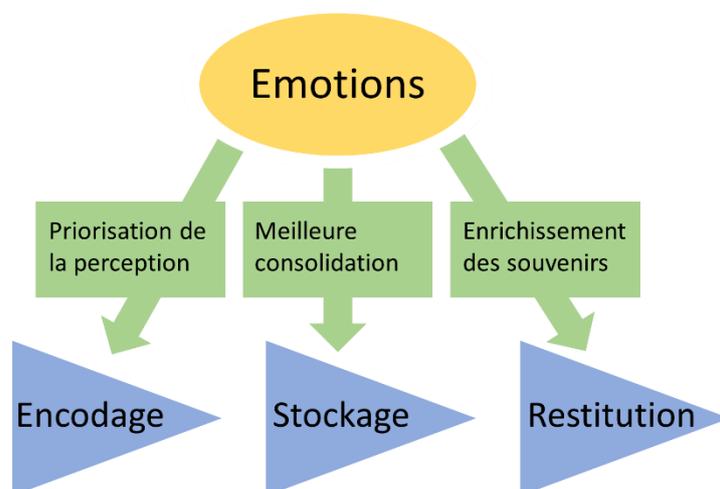
Les émotions ont pour conséquence de créer des modifications temporaires de nos traitements cognitifs. En effet, de nombreuses études ont montré que les émotions avaient un impact sur l’attention (Pêcher, Lemerrier & Cellier, 2009, 2011). En outre, cet impact peut interférer ou améliorer notre attention visuelle. Par exemple, Öhman, Flykt, et Esteves (2001) ont mis en place un paradigme dans lequel les participants devaient trouver un item-cible au sein d’un groupe de distracteurs. La valence de l’item-cible était soit négative (représentant un

serpent ou une araignée) avec des distracteurs neutres (des champignons ou des fleurs), soit la valence de l'item-cible était neutre, avec des distracteurs négatifs. Les résultats ont montré que si l'item-cible est négatif parmi des distracteurs neutres, alors les temps de réaction des participants étaient inférieurs à la situation inverse (item-cible neutre avec distracteurs négatifs). Globalement, les stimuli émotionnels (négatifs/positifs) semblent accéder à notre conscience plus facilement que les stimuli neutres, et ce d'autant plus lorsque nos ressources attentionnelles sont limitées (Alpers & Gerdes, 2007 ; Alpers et al., 2005 ; Anderson & Shimamura, 2005 ; Anderson & Phelps, 2001 ; Yang, Zald, & Blake, 2007). Si les stimuli émotionnels améliorent les performances attentionnelles lorsque ce sont les item-cibles, ils perturbent les performances attentionnelles quand ils servent de distracteurs (Most, Chun, Widders, & Zald, 2005 ; Fox, Russo, Bowles, & Dutton, 2001 ; Smith, Most, Newsome, & Zald, 2006).

### **3.2.2 Émotions et mémoire**

A l'instar des autres processus cognitifs, la mémoire est également affectée par les émotions (voir Figure 17). Il a par exemple été montré que les informations émotionnelles pouvaient bénéficier d'une meilleure mémorisation (Monnier & Syssau, 2008 ; Syssau & Monnier, 2012). En outre, des études ont montré que ressentir des émotions pouvaient améliorer l'encodage d'informations (Craig, Govoni, Naveh-Benjamin, & Anderson, 1996 ; Heuer & Reisberg, 1992 ; Loftus, Loftus & Messo, 1987). A noter qu'il est probable que cette amélioration de l'encodage soit étroitement liée aux effets des émotions sur l'attention et la perception (Easterbrook, 1959). Comme évoqué précédemment, les émotions peuvent influencer sur le stockage en mémoire des informations. Les émotions permettent ainsi une meilleure consolidation des informations en mémoire (Berlyne, 1969 ; Heuer & Reisberg, 1992 ; Kleinsmith & Kaplan, 1963 ; McGaugh, 2000). De plus, la restitution des informations en

mémoire semble elle aussi être de meilleure qualité si des émotions sont impliquées (Brown & Kulik, 1977 ; Lindsay, Read, & Sharma, 1998).



**Figure 17.** Représentation schématique des différents effets des émotions sur la mémoire.

### ***3.2.3 Emotions et prises de décision***

Les émotions sont essentielles dans la prise d'une décision. Après constatation du résultat d'une prise de décision de notre part, nous pouvons ressentir de la joie, de la satisfaction, du regret ou même de la frustration. L'intérêt de ressentir ces émotions est que lorsque nous effectuons une prise de décision, notre choix est souvent motivé par l'anticipation des émotions que nous ressentirons après avoir effectué le choix. C'est cette envie de ressentir une émotion positive qui nous motive parfois à affiner et choisir la décision qui nous semble la plus optimale. Dans les premiers travaux menés par l'équipe de Damasio (1995), des individus sains participaient au "*Iowa Gambling Task*". Dans cette tâche, les participants doivent piocher des cartes une par une provenant de 4 paquets de carte différents, dont deux sont en fait des "mauvaises pioches" rapportant 100\$ en cas de gain mais faisant perdre 1250\$ en cas de perte, et dont les deux autres sont des "bonnes pioches" rapportant 50\$ en cas de gain mais faisant perdre 250\$ en cas de perte. Le résultat "classique" observé est que les participants réussissent

généralement la tâche : au fur et à mesure, les participants s'orientent de plus en plus vers les paquets de cartes "bonne pioche", et leur conductance électrodermale augmentait lorsqu'ils décidaient de piocher une carte des paquets "mauvaise pioche". De manière intéressante, Damasio montre que des patients ayant une lésion du cortex préfrontal ventromédian, qui sont qualifiés "d'émotionnellement plat" (Damasio, 1995) ont un profil très différent. Ces participants n'appliquent pas nécessairement les meilleures stratégies, ils piochent autant dans les mauvais que les bons paquets de carte, et leur conductance électrodermale n'augmente pas lorsqu'ils décident de piocher dans les mauvais paquets (Bechara, Damasio, Tranel & Damasio, 1997, 2005). Pour expliquer ces différences entre participants "sains" et participants cérébro-lésés Damasio propose le concept de "marqueurs somatiques", mécanismes qui permettraient d'activer les conséquences somatiques de nos décisions. Les patients dépourvus de ces marqueurs prendraient des décisions sans accès à des informations sur les conséquences somatiques de leurs décisions, ces informations s'avérant au final cruciales pour un comportement adapté. En écho à ces travaux, des recherches en neuro imagerie montrent que lorsqu'une personne doit choisir entre prendre de l'argent ou le donner à une association caritative, plus l'activation de l'amygdale et du striatum ventral est importante (signifiant que ces participants ressentent plus de plaisir en gagnant de l'argent), plus ils ont tendance à effectuer le choix égoïste en gardant l'argent pour eux (Brosch et al., 2011 ; Brosch, Coppin, Schwartz & Sander, 2012).

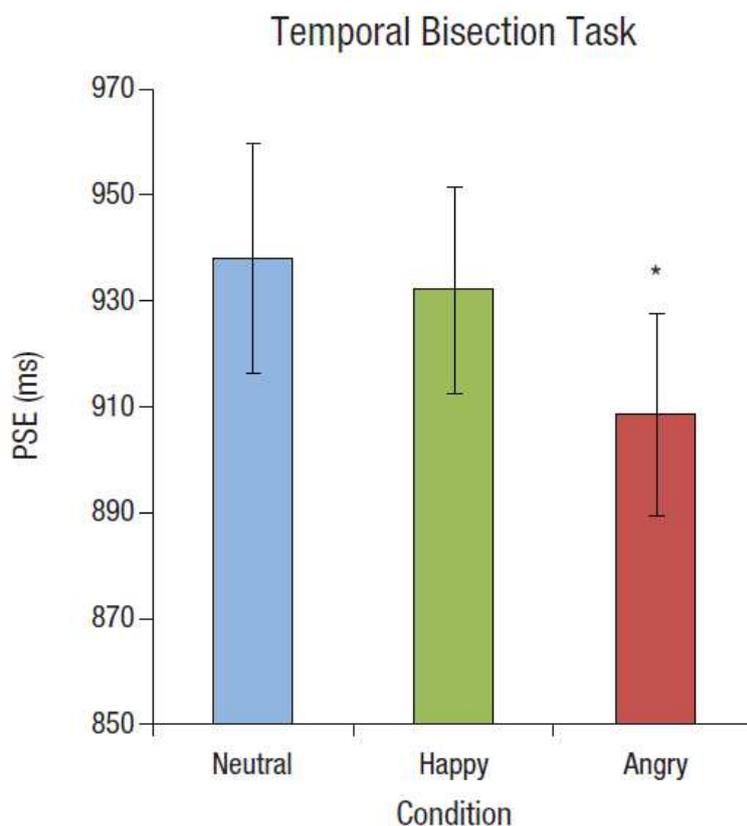
Comme décrit ci-dessus, les émotions sont capables de provoquer de réels changements physiologiques chez l'être humain. Elles peuvent moduler notre attention, optimiser notre mémoire, et elles constituent un moteur essentiel dans nos prises de décision. Les études sur les émotions représentent un champ très vaste dans la littérature scientifique. Mais qu'en est-il des relations émotions-magnitudes ?

### 3.3 Les émotions et les magnitudes

Les études sur les émotions montrent que les émotions à fort arousal provoquent une mémorisation sélective plus importante, et une focalisation de l'attention, permettant d'être plus précis sur les cibles de l'attention au détriment des stimuli compris dans le champ attentionnel périphérique (Bacon, 1974 ; Cahill & McGaugh, 1998 ; Easterbrook, 1959 ; Hamann, 2001). Les émotions positives, quant à elles, semblent élargir le champ de l'attention et mobiliser avantageusement d'autres processus cognitifs comme la créativité (Fredrickson 2001, 2004 ; Fredrickson & Branigan, 2005). De plus, les émotions positives semblent produire une amélioration de l'intégration des informations lors de la résolution d'un problème ou d'une prise de décision (Clore & Palmer, 2009 ; Gasper & Clore, 2002 ; Hockey et al., 2000). Elles permettent aussi une meilleure mémorisation des détails périphériques (Bernstein, 2002 ; Kensinger & Corkin, 2003 ; Phelps 2006 ; Reisberg & Heuer, 2004) alors que les émotions négatives permettent une meilleure mémorisation des détails centraux et une vision plus analytique des faits (Bernstein, 2002 ; Bless & Fiedler, 2006 ; Bless, 2001 ; Fiedler, 2001 ; Libkummann et al., 2004). Dans le domaine de l'estimation des magnitudes, il semble que les émotions ont un impact important sur l'estimation des magnitudes, et particulièrement sur les estimations temporelles et de numérosité.

Les nombreuses études mettant en relation les émotions et les estimations temporelles montrent presque toutes que les émotions négatives à fort arousal provoquent une surestimation des estimations temporelles (Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011 ; Tipples, 2008). En 2013, Young et Cordes ont mis en place une expérience typique afin d'évaluer l'effet des émotions sur nos estimations de magnitudes. L'une des tâches de cette expérience était une tâche de bissection temporelle. Les participants devaient estimer si la durée de présentation du stimulus (un ovale dont la durée variait entre 400 et 1600 ms) était plutôt proche de la durée la plus courte (400 ms) ou de la durée la plus longue (1600 ms). Avant

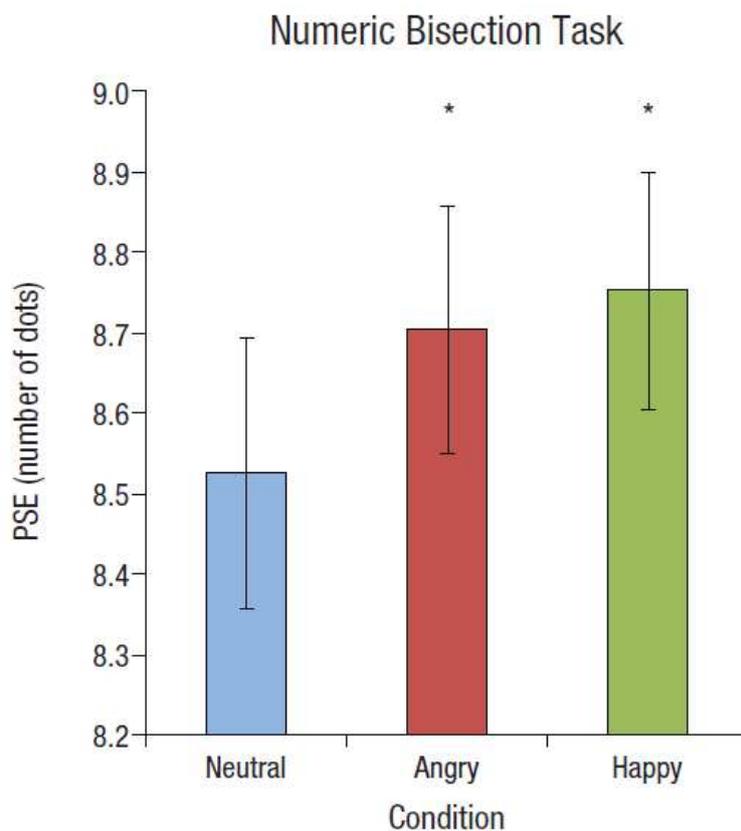
chaque essai, un visage apparaissait pendant 400 ms. Ce visage était soit neutre, soit joyeux, soit en colère. Les résultats montrent que lorsque le visage qui précédait l'essai était un visage en colère, les participants avaient tendance à surestimer la durée (voir Figure 18).



**Figure 18.** Points d'égalité subjective (PSE) de la durée estimée en fonction du type de visage présenté avant l'essai. Notez que plus un PSE est faible, plus il traduit une surestimation importante de la part des participants (Young & Cordes, 2013).

Selon la théorie AToM, le traitement des magnitudes impliquerait un système commun à chaque magnitude (Buetti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003). En nous basant sur les hypothèses de la théorie AToM, les émotions devraient impacter les magnitudes de manière similaire. Au regard des conclusions de la littérature vis-à-vis de l'effet des émotions sur nos estimations temporelles, les émotions devraient ainsi provoquer une surestimation de nos estimations spatiales et numériques, à l'instar de leur impact sur nos estimations temporelles. Cependant, les expériences menées sur l'effet des émotions sur l'estimation de numérosité tendent à

montrer que les émotions négatives provoquent une sous-estimation des numérosités (Baker et al., 2013 ; Hamamouche et al., 2017 ; Young & Cordes, 2013), et qu'il en est de même avec les émotions positives (Lewis, Zax, & Cordes, 2018 ; Young & Cordes, 2013). Dans le second bloc de leur expérience, Young et Cordes (2013) ont recours à une tâche de bissection de numérosité. Les participants devaient estimer si le nombre de points à l'écran (entre 4 et 16 points apparaissaient à l'écran pendant 400 ms) était plutôt proche du plus petit nombre de points (4 points) ou du plus grand nombre de points (16 points). Avant chaque essai, un visage apparaissait pendant 400 ms. Ce visage était soit neutre, soit joyeux, soit en colère. Les résultats montrent que lorsque le visage qui précédait l'essai était un visage en colère ou un visage joyeux, alors les participants avaient tendance à sous-estimer le nombre de points (voir Figure 19).

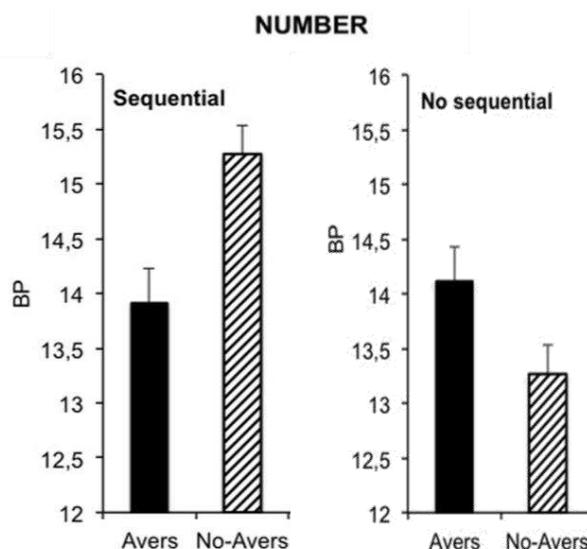


**Figure 19.** Points d'égalité subjective (PSE) du nombre de points estimé en fonction du type de visage présenté avant l'essai. Notez que plus un PSE est élevé, plus il traduit une sous-estimation importante de la part des participants (Young & Cordes, 2013).

Ce constat ne semble pas correspondre aux attentes de la théorie AToM, puisque les émotions impactent la numérosité dans le sens d'une sous-estimation et l'estimation du temps dans le sens d'une surestimation. En revanche, une étude menée par Droit-Volet en 2013 a conduit à relancer le débat sur le lien entre les émotions et les magnitudes. L'objectif de cette étude était de tester l'importance d'équilibrer les tâches d'estimation en termes de demande d'accumulation de l'information. En effet, l'estimation de durée nécessite par définition d'accumuler l'information temporelle, donc des ressources en mémoire de travail sont nécessairement engagées. A l'inverse, les informations sur une distance/longueur ou sur un nuage de points peuvent être délivrées dès lors qu'ils apparaissent à l'écran si leur affichage est instantané. Il est cependant possible que l'obtention d'informations sur une

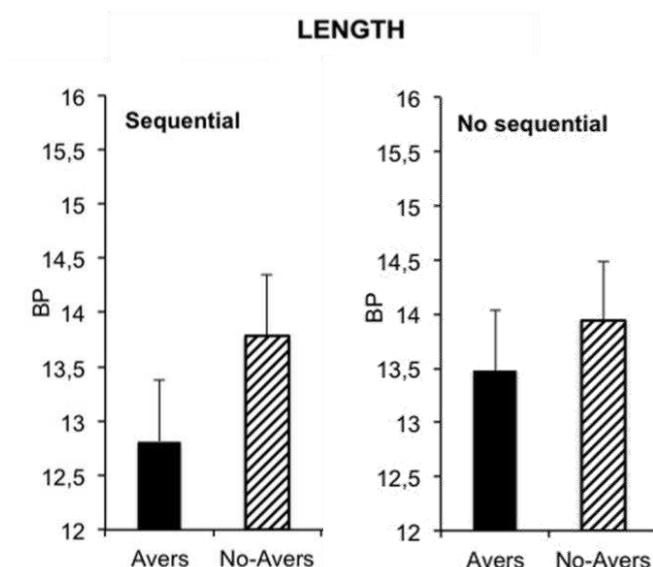
distance/longueur ou sur un nuage de points nécessite aussi de l'accumulation d'information, à condition que leur présentation soit séquentielle. Une présentation séquentielle d'un stimulus suppose qu'il apparaisse en plusieurs fois, de manière progressive et/ou dynamique.

Dans cette expérience, deux groupes de participants devaient effectuer une tâche de bissection de numérosité. Les participants devaient estimer à chaque essai si la quantité de points affichées était plutôt petite ou grande (en comparaison des quantités minimales et maximales possibles). Afin de provoquer une émotion négative chez les participants, dans certains essais un bip sonore aversif était émis dans les oreilles des participants juste après l'affichage du stimulus. Dans une condition "non-séquentielle", un des deux groupes voyait à chaque essai un nuage de points contenant tous les points à estimer apparaître puis disparaître. L'autre groupe, en condition dite "séquentielle", voyait à chaque essai plusieurs nuages de points successifs et les participants devaient mentalement accumuler pour estimer la numérosité totale de l'essai. Les résultats montrent qu'en condition "non-séquentielle" l'émotion négative provoquée par le bip sonore aversif a pour effet de créer une sous-estimation des numérosités estimées, ce qui est congruent avec les résultats de la littérature. Cependant, de manière très intéressante, les résultats montrent qu'en condition "séquentielle" l'émotion négative engendre cette fois une surestimation des numérosités estimées (voir Figure 20).



**Figure 20.** Points de bissection (BP) moyens des estimations de numérosité en fonction du type de bip et de la condition (séquentielle vs. non-séquentielle). Un petit point de bissection sous-tend une surestimation, tandis qu'un grand point de bissection signifie qu'il y a une sous-estimation des participants (Droit-Volet, 2013).

Il est à noter également qu'il n'existe à ce jour que très peu d'études montrant un changement significatif de notre capacité à estimer des distances sous l'influence d'une émotion. L'une des seules à y parvenir est l'étude de Droit-volet (2013) décrite précédemment. Dans cette étude, l'expérience réalisée comportait également deux autres groupes de participants, qui devaient cette fois effectuer une tâche d'estimation spatiale. Le protocole était similaire, à l'exception que les participants devaient donc estimer la longueur des lignes, en non-séquentiel pour le premier groupe (juste une ligne à estimer), et en séquentiel pour le deuxième groupe (plusieurs morceaux de ligne à la suite, dont ils devaient estimer la longueur additionnée totale). Là aussi les résultats sont particulièrement intéressants car, si globalement de manière "classique" l'émotion négative ne semble pas impacter les estimations spatiales, dans le groupe en condition "séquentielle" les participants cette fois surestiment les distances lorsqu'ils écoutaient le bip aversif (voir Figure 21).



**Figure 21.** Points de bissection (BP) moyens des estimations spatiales en fonction du type de bip et de la condition (Droit-Volet, 2013).

Ces données sont particulièrement intéressantes car si l'on suit les prédictions de la théorie AToM (Bueti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003), l'effet d'une émotion sur les magnitudes est censé être similaire d'une magnitude à une autre. Or, le fait que sous l'influence d'une émotion négative les estimations temporelles soient surestimées, que les estimations de numérosité soient sous-estimées, et que l'estimation spatiale y soit insensible, est difficilement compatible avec les prédictions du modèle AToM. Ce constat général dans la littérature peut laisser perplexe quant à la validité de modèles envisageant l'existence d'un système commun du traitement des magnitudes. L'étude de Droit-Volet en 2013 conduit cependant à nuancer cette opposition entre les résultats de la littérature et les hypothèses de la théorie AToM, en montrant qu'en utilisant des stimuli séquentiels, les numérosités et les distances étaient surestimées, tout comme les durées.

## Conclusion

En résumé, des liens ont été clairement établis entre les magnitudes et notre capacité à les estimer. D'un point de vue neuronal, l'estimation d'une magnitude entraîne

systématiquement une activation du cortex pariétal, et en particulier du sillon intrapariétal. Sur le plan comportemental, notre capacité à estimer les différentes magnitudes semble avoir une trajectoire développementale similaire quelle que soit la magnitude. De plus, les estimations de l'espace, du temps et de la numérosité sont chacune affectées par des effets similaires biaisant les estimations (l'effet de taille, l'effet de distance, voir chapitre 1). Par ailleurs, bien que la majorité des études portant sur le lien Émotion-Magnitude suggèrent que l'effet des émotions négatives diffère en fonction de la magnitude à traiter (surestimation temporelle, mais pas d'effet sur l'estimation spatiale, et une sous-estimation numérique : voir Baker, 2013 ; Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011 ; Hamamouche et al., 2017 ; Tipples, 2008 ; Young & Cordes, 2013), il semblerait que le lien Émotion-Magnitude soit hautement dépendant de la nature des stimuli. Lorsque les stimuli sont séquentiels, impliquant une accumulation d'informations dans le temps et donc des ressources en mémoire de travail (voir chapitre 3), alors une émotion négative à fort arousal semble entraîner une surestimation des durées, mais aussi de la numérosité et de l'espace.

## **Objectifs des chapitres expérimentaux**

De nombreux travaux dans la littérature ont mis en évidence des effets d'interférence entre les magnitudes (voir chapitre 2). Les résultats de toutes ces études ont amené des chercheurs à proposer l'existence d'un système commun permettant d'estimer toutes les magnitudes, de manière similaire, et étant à l'origine d'effets d'interférence, réciproques et symétriques entre les magnitudes. Cependant, de nombreuses études mettent à mal cette théorie. Sur le plan neuronal, le traitement de la numérosité semble nécessiter l'activation de bien d'autres régions cérébrales que le sillon intrapariétal et le traitement du temps, qui sollicite lui aussi des réseaux cérébraux largement distribués (voir chapitre 1). Sur le plan comportemental, les effets d'interférence n'ont pas du tout les caractéristiques que prédit la

théorie AToM (voir chapitre 2). Ces observations ont conduit à proposer des théories alternatives sur le fonctionnement et la hiérarchisation du système de traitement des magnitudes, telle que la théorie de la métaphore conceptuelle, théorie qui repose sur des travaux en psycholinguistique. Cette théorie alternative propose que l'espace occupe une place prépondérante au sein du système de traitement des magnitudes, et notre système cognitif serait spécialisé pour cette magnitude en particulier pour ensuite se recycler et s'adapter aux autres magnitudes. L'argument phare de cette théorie est le fait que l'espace module généralement fortement nos estimations temporelles, alors que le temps ne module pas, ou seulement très peu, nos estimations spatiales. Cependant, divers biais méthodologiques semblent pouvoir être responsables de cette asymétrie entre l'espace et le temps. L'estimation temporelle induit nécessairement la sollicitation de ressources en mémoire de travail (i.e. ressources cognitives), contrairement aux tâches d'estimation spatiale qui utilisent rarement des stimuli séquentiels. C'est ce que nous avons cherché à examiner dans le 4<sup>ème</sup> chapitre de cette thèse, afin de répondre à la question suivante : "L'asymétrie des interférences espace-temps ne peut-elle pas être modulée, voire inversée, en se basant sur la demande en ressources cognitives comme indicateur de difficulté de la tâche plutôt que sur la précision (ratio de weber) ?". Répondre à cette question permet de prendre du recul vis-à-vis de l'importance attribuée à l'intensité des effets d'interférence espace-temps. De plus, la littérature semble suggérer que l'estimation du temps requiert d'autres ressources que celles impliquées dans l'estimation de l'espace. Ces résultats nous ont amenés à nous demander si les effets Kappa et Tau n'interviendraient finalement pas à des étapes différentes dans le traitement de l'information. Les effets Tau et Kappa pourraient émerger de processus différents lors de l'estimation d'une dimension spatiale ou temporelle. L'objectif du second chapitre était de déterminer dans quelle mesure l'importance des effets Kappa et Tau variait en fonction de la précision et des ressources cognitives engagées de chaque participant dans les tâches d'estimation de distances et de

durées. Une expérience a donc été réalisée pour investiguer les différences interindividuelles. Si les effets Kappa et Tau apparaissent à différentes étapes durant le processus d'estimation, alors cela remettrait en cause l'idée que leur provenance serait uniquement dû au système de traitement des magnitudes. Enfin, les résultats intéressants obtenus lors de l'étude de Droit-Volet en 2013 ont permis de raviver le débat autour du lien entre émotion et magnitude. Par ailleurs, à notre connaissance, aucune étude n'a testé l'effet des émotions sur les effets d'interférence entre magnitudes plutôt que simplement sur les magnitudes elles-mêmes. Ainsi, dans le 6<sup>ème</sup> chapitre, nous présenterons un paradigme d'induction émotionnelle dans lequel les informations sur les stimuli sont délivrées de manière séquentielle (à l'instar des stimuli utilisés dans l'étude de Droit-Volet en 2013). Nous avons premièrement tenté de répliquer l'effet des émotions sur le temps et l'espace (surestimation des durées et des distances en "séquentiel"). Deuxièmement, nous voulions étudier l'impact de ces émotions sur les effets d'interférence espace-temps. Enfin, nous souhaitions déterminer si ce potentiel effet de l'émotion est similaire pour Tau et Kappa. L'objectif final de cette série expérimentale est également de s'interroger sur l'intérêt d'utiliser l'existence des effets d'interférence des magnitudes pour débattre de la façon dont fonctionnerait et serait potentiellement hiérarchisé le ou les système(s) du traitement des magnitudes. Car si les effets Tau et Kappa sont issus de processus différents, et interviennent à des étapes séparées du traitement de l'information, alors on ne peut attribuer leur existence à un système commun du traitement des magnitudes. Il serait donc délicat de s'appuyer sur ces preuves comportementales pour argumenter et illustrer l'articulation hiérarchique du système commun du traitement des magnitudes. Ces considérations sont discutées dans la dernière partie de ce manuscrit.

# Chapitre 4 : Relativité des effets d'interférence

## espace-temps

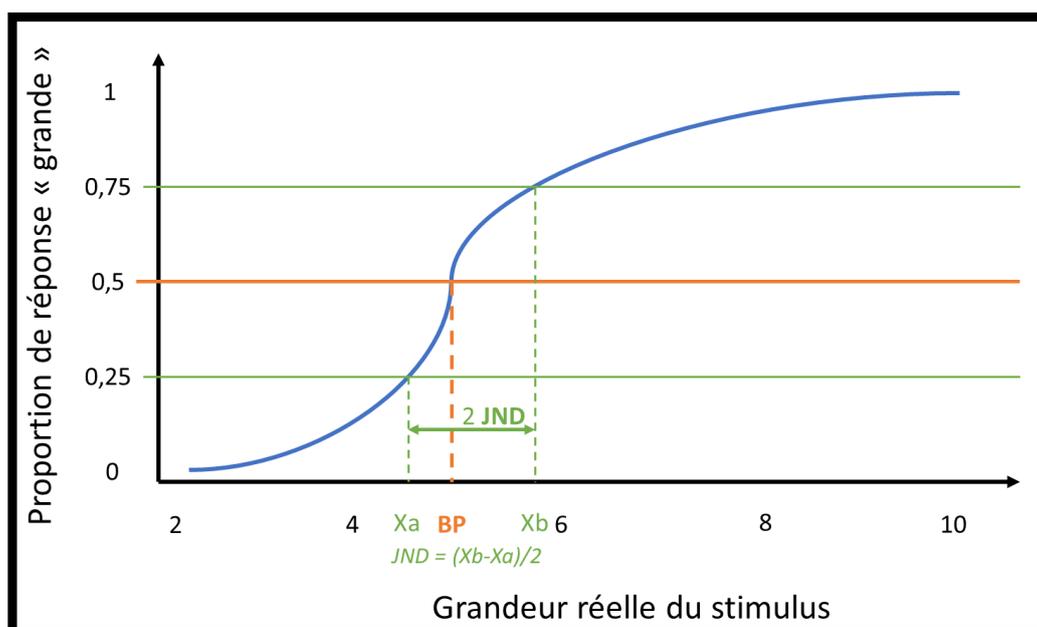
### Introduction

Un effet d'interférence de l'espace sur le temps consiste en une distorsion de nos estimations temporelles en fonction des caractéristiques spatiales (taille, longueur, ou distance...) du stimulus dont la durée est estimée. Plus la dimension spatiale du stimulus est élevée/grande, plus la durée du stimulus a tendance à être surestimée, c'est ce qu'on appelle l'"effet Kappa". Les études ayant démontré l'existence de cet effet sont légions, cet effet est robuste et largement répliqué dans la littérature depuis sa découverte (Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou & Boroditsky, 2010 ; Cohen, Hansel & Sylvester, 1953 ; Reali, Lleras & Alviar, 2019). La réciproque de l'effet Kappa est l'"effet Tau". L'effet Tau décrit l'effet d'interférence causé par le temps sur l'espace, consistant en une distorsion de nos estimations spatiales en fonction des caractéristiques temporelles (durée de présentation, ou durée d'absence) du stimulus dont la dimension spatiale est estimée (Helson & King, 1931). Plus la durée est élevée/longue, plus la dimension spatiale du stimulus aura tendance à être surestimée. Selon les différentes théories du SCTM, les effets d'interférence entre les magnitudes constitueraient une preuve comportementale de l'existence de ce système de traitement. Ces effets d'interférence seraient représentatifs de la façon dont fonctionnerait et serait potentiellement hiérarchisé le SCTM. La non-reproductibilité de l'effet Tau rapporté dans les études de ces dernières décennies a mis en porte-à-faux le modèle théorique le plus admis jusque-là.

Ainsi, la théorie AToM (Buetti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003), prônant une répartition équivalente des magnitudes au sein du système de traitement, prédisant une réciprocité et une symétrie des effets d'interférence entre les magnitudes, est challengée par d'autres théories, dont celle de la théorie de la métaphore conceptuelle (CMT ; Clark, 1973 ; Lakoff & Johnson, 1980 ; 1999). Cette théorie alternative suggère quant à elle que la capacité d'estimation primaire serait la capacité à estimer l'espace, et que sur la base de cette capacité à estimer l'espace serait développé d'autres aptitudes, dont celle de pouvoir estimer les autres magnitudes. La théorie CMT, issue de solides recherches en psycholinguistique, permettrait d'expliquer l'asymétrie entre les effets d'interférence espace-temps (Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al., 2010).

Cependant, le traitement du temps nécessite des processus attentionnels et une charge cognitive assez importante. Nous nous sommes donc demandé si l'absence d'effet Tau pouvait être liée à un déséquilibre dans les paradigmes expérimentaux utilisant des tâches d'estimation des magnitudes. En outre, les études portant sur les effets d'interférence espace-temps sont généralement composées d'une tâche d'estimation du temps, avec des variations spatiales (pour produire un effet Kappa), ainsi que d'une tâche d'estimation de l'espace avec des variations temporelles (pour produire un effet Tau). Les tâches de bissection font partie des tâches classiquement utilisées dans les études sur les estimations de magnitude. Une tâche de bissection commence par une phase de familiarisation avec l'affichage des valeurs extrêmes (la valeur minimale et la valeur maximale) des magnitudes à estimer. Il s'ensuit une phase d'entraînement sur ces valeurs extrêmes, puis la phase expérimentale commence, durant laquelle les valeurs intermédiaires sont ajoutées. Les participants doivent répondre en disant si la caractéristique à estimer du stimulus est plutôt proche de la valeur minimale, ou de la valeur maximale.

Pour une tâche de bissection, le BP (Bisection point, ou Point de bissection), que l'on nomme aussi le "PSE" (Point of subjective equality, ou Point d'égalité subjective), est la valeur de la magnitude pour laquelle le participant est le plus indécis pour la qualifier de "petite" ou de "grande" (voir Figure 22), puisque théoriquement, il répond autant de fois "petite" que "grande" pour cette même valeur. Sur un graphique, le BP correspond à la valeur sur l'axe des abscisses pour lequel le participant a une proportion de réponse "grande" de 0,5 (signifiant que cette valeur de magnitude est estimée dans 50% des cas comme étant petite, et 50% des cas comme étant grande). On notera que plus un participant a un BP petit, plus le participant a tendance à surestimer la magnitude. A contrario plus un participant a un BP est élevé, plus il a tendance à sous-estimer la magnitude. Le JND (*Just noticeable difference*) constitue la moyenne entre la valeur de magnitude minimale nécessaire pour que le participant passe de 0,5 de proportion de réponse "grande" à 0,25, avec la valeur de magnitude minimale nécessaire pour que le participant passe de 0,5 de proportion de réponse "grande" à 0,75. Le JND est représentatif de la précision du participant dans la tâche. Plus le JND d'un participant est faible, plus ce participant est précis, car cela signifie qu'il suffit d'un léger changement de grandeur du stimulus pour que le participant arrive à l'estimer à peu près correctement (voir Figure 22).



**Figure 22.** Schéma illustrant ce que représentent le BP et le JND

Lorsqu'un protocole expérimental est composé de plusieurs tâches de bisection, les tâches sont habituellement équilibrées de manière à ce que les ratios de Weber des participants dans ces tâches soient équivalents (Casasanto & Boroditsy, 2008 ; Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015 ; Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017). Le ratio de Weber est une valeur censée représenter un seuil minimal de différences entre deux stimuli pour qu'un participant puisse les distinguer. Pour une tâche de bisection (tâche où il faut estimer si la magnitude à estimer est plutôt "petite" ou "grande" en fonction des valeurs extrêmes possibles), le ratio de Weber est calculé en divisant le JND par le BP.

Notez qu'utiliser le JND au lieu du ratio de Weber pour équilibrer les tâches ne ferait pas sens, car il est absurde de comparer des distances avec des durées. On ne peut pas dire d'un centimètre qu'il est équivalent à une seconde. En effet, l'unité de mesure d'un JND spatial est une unité de mesure métrique (millimètre, centimètre, mètre, etc...), alors que l'unité de mesure d'un JND temporel est une unité de mesure de temps (secondes, minutes etc...). Comment peut-on déterminer que 14 031 879 millisecondes soient plus importantes que 10 071 856

ampères ? La comparaison de JND issus de magnitudes différentes n'a donc pas lieu d'être. C'est pourquoi l'utilisation du ratio de Weber semble plus pertinente, car il représente le ratio JND/BP permettant ainsi d'avoir une idée de la précision (JND) proportionnellement à la grandeur des stimuli de la tâche (BP). L'intérêt du ratio de Weber est donc d'obtenir une mesure indépendante de la valeur absolue des modalités utilisées.

Néanmoins, nous pensons que le ratio de Weber n'est pas la mesure la plus adaptée pour déterminer si deux tâches différentes sont de difficultés équivalentes. Premièrement, le ratio de Weber mesure une précision physique, peu dépendante du taux de réussite à la tâche. En outre, nous pensons que lorsque l'on effectue une tâche de bissection, plus l'écart entre les magnitudes extrêmes est important, plus la tâche sera facile (haut taux de bonnes réponses), mais plus le ratio de Weber sera élevé (signifiant une moins bonne précision). Par exemple, si les magnitudes extrêmes d'une tâche de bissection spatiale sont 2cm et 30cm, alors les BP tourneront autour de 16cm, mais les JND seront plus importants que dans le cas où les magnitudes extrêmes seraient 13cm et 19cm. Ainsi, bien que la tâche avec 2cm et 30cm comme magnitudes extrêmes soit finalement plus simple grâce au grand écart qui sépare ces valeurs extrêmes, le ratio de Weber des participants serait plus petit avec 13cm et 19cm comme magnitudes extrêmes, car pouvoir faire la différence entre 16cm et 13cm (ou entre 16cm et 19cm) requiert une bien plus grande précision physique que pour faire la différence entre 16cm et 2cm (ou entre 16cm et 30cm). Ce phénomène a déjà été discuté et utilisé dans la littérature (Brus, Heng & Polania, 2019 ; Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017 ; Pardo-Vasquez et al., 2019). Ainsi, le ratio de Weber s'avère finalement ne pas être totalement indépendant des modalités de la magnitude à estimer.

Deuxièmement, effectuer un équilibrage des tâches en ne se basant que sur la précision des participants ne permet pas d'obtenir des tâches ayant une difficulté équivalente. Selon nous, le meilleur moyen de calibrer la difficulté de tâches d'estimation de magnitude est de faire en

sorte que la demande en ressource cognitive de chacune des tâches soit équilibrée. De récentes études ont mis en évidence ce problème, estimant que l'utilisation simple du ratio de Weber ne permettait pas d'équilibrer les tâches (Brus, Heng & Polania, 2019 ; Link, 1992 ; Pardo-Vasquez et al., 2019 ; Simen, Vlasov & Papadakis, 2016). Ces études ont d'ailleurs suggéré une comparaison des temps de réaction entre les tâches afin de mesurer la demande en ressource cognitive des tâches. Si les participants ont des temps de réaction plus élevés dans une tâche d'estimation de magnitude A que dans une tâche B, alors c'est que la tâche A demande plus de ressources cognitives.

De plus, il est important de souligner que la plupart des études contenant des paradigmes expérimentaux d'estimation spatiale n'utilisent pas de stimuli dynamiques, pour lesquels l'information est délivrée de manière séquentielle pour estimer l'espace. C'est un problème dans le sens où lorsque l'on effectue une estimation temporelle, l'information relative à la durée d'un stimulus est nécessairement délivrée séquentiellement (apparition puis disparition du stimulus, ou apparition d'un stimulus puis apparition d'un autre stimulus). Estimer la durée d'un événement ou entre deux événements demande par définition d'accumuler de l'information dans le temps. Un stimulus est dit "statique" lorsqu'il apparaît d'un seul coup, alors qu'un stimulus est dit "séquentiel" s'il apparaît progressivement au cours du temps. Par exemple, dans une tâche où l'on doit estimer la longueur/distance du stimulus, l'affichage d'une ligne entière est un stimulus statique car on a accès à sa longueur totale dès son apparition. Mais si le stimulus est un point qui se déplace linéairement durant toute la durée de l'essai, alors c'est un stimulus séquentiel, car la distance parcourue est délivrée au fur et à mesure de l'essai, nous forçant à rester attentif au stimulus.

Lorsqu'un stimulus est statique, la dimension spatiale du stimulus peut nous influencer durant toute la séquence d'estimation. En effet, il semble délicat de s'attendre à un effet Tau si nous avons accès à la l'information "distance" avant même d'avoir accès à l'information

"durée". Si nous devons estimer la longueur d'une ligne dont la durée de présentation varie, nous saurons généralement estimer sa taille avant même qu'elle n'ait eu le temps de disparaître, bloquant toute possibilité d'être influencé par la durée de présentation de la ligne. Ainsi, il semble bien plus pertinent d'utiliser des paradigmes expérimentaux avec des magnitudes présentées séquentiellement si l'on souhaite étudier un potentiel effet du temps sur la magnitude cible (Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015 ; Coull & Droit-Volet, 2018).

L'objectif de ce chapitre expérimental était donc de montrer que si les conditions "magnitudes séquentielles" et "demandes cognitive équivalentes" pour des tâches d'estimation spatiale et temporelle étaient respectées, alors les participants seraient plus à même de subir un effet Tau. Les trois expériences faisant l'objet d'une soumission dans la revue "*Attention, Perception, & Psychophysics*", nous allons résumer dans les grandes lignes ces trois expériences, puis nous inclurons le texte soumis à la revue, contenant ainsi les détails manquants aux résumés des expériences.

## **4.1 Résumé de l'expérience 1 - Reproduction de l'asymétrie**

### **Kappa > Tau**

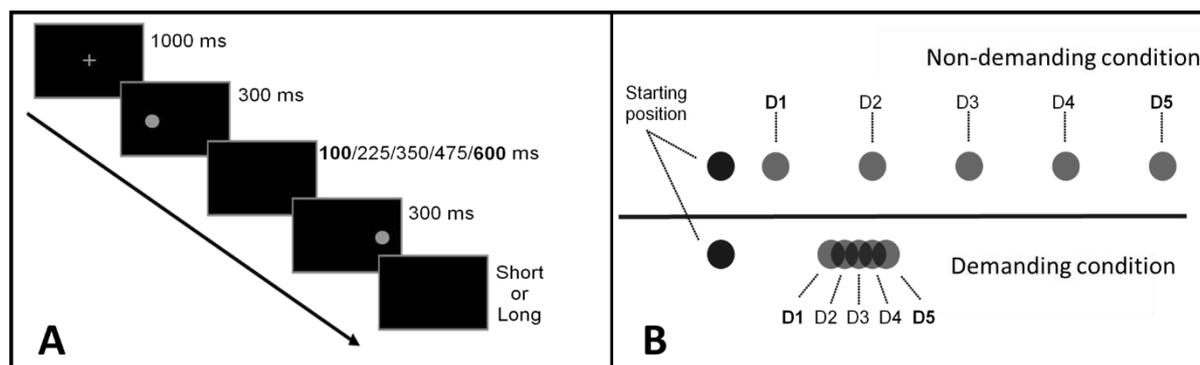
#### Méthode

La première expérience de cette étude avait pour but de reproduire les résultats obtenus habituellement dans la littérature (supériorité de l'effet Kappa comparé à l'effet Tau), avec un paradigme utilisant des stimuli séquentiels. Cependant, la tâche d'estimation des distances était une tâche simple, demandant peu de ressources cognitives. Dix-neuf participants ont donc participé à cette première expérimentation sur un PC portable avec un écran de 15,6 pouces. Les participants ont effectué une tâche de bisection spatiale et une tâche de bisection

temporelle. Chaque tâche était constituée d'une procédure similaire, seules les consignes des participants changeaient. Les tâches étaient composées de séries d'essais, tout était affiché en gris sur un écran noir. A chaque essai, une croix de fixation grise apparaissait pendant 1000 ms, suivie d'un point gris de  $0,8^\circ$  d'angle visuel de diamètre apparaissant pendant 300 ms sur l'écran ( $1^\circ$  d'angle visuel correspondant à 1cm sur l'écran lorsque le participant se trouve à environ 57cm de l'écran). Puis, un autre point gris apparaissait à l'écran pendant 300 ms, suivi d'un point d'interrogation gris afin de signifier au participant qu'il devait procéder à l'estimation (voir Figure 23). La distance qui séparait les deux points sur l'axe horizontal variait de  $1,6^\circ$  à  $12,8^\circ$ . La durée entre la disparition du premier point et l'apparition du second point variait aussi, allant de 100 ms à 600 ms. Lors de la tâche spatiale, la distance entre les deux points pouvait prendre 5 valeurs, la magnitude pertinente à estimer était donc constituée de 5 modalités, la distance entre les deux points pouvait être de  $1,6^\circ$ ,  $4,4^\circ$ ,  $7,2^\circ$ ,  $10^\circ$  ou  $12,8^\circ$ . La magnitude non pertinente (à ignorer) était constituée de 2 modalités. Ces 2 modalités correspondaient aux durées extrêmes, qui était donc soit de 100 ms, soit de 600 ms. A l'inverse, lors de la tâche temporelle, la durée entre les 2 points pouvait prendre 5 valeurs, la magnitude pertinente à estimer était donc constituée de 5 modalités, la durée entre les deux points pouvait être de 100, 225, 350, 475 ou 600 ms. La magnitude non pertinente (à ignorer) était constituée de 2 modalités. Ces 2 modalités correspondaient aux distances extrêmes, qui était donc soit de  $1,6^\circ$ , soit de  $12,8^\circ$ . Pour cette expérience, le choix de l'ordre de grandeur des distances et des durées est basé sur celles généralement employées dans la littérature.

Pour que le participant ne puisse pas anticiper la position d'apparition du stimulus 1, il apparaissait sur l'une des 4 positions de départ possibles. Deux des positions de départ se situaient à gauche de l'écran, et les deux autres à droite de l'écran. De plus, lorsque le premier point apparaissait à gauche, le second point apparaissait à droite, et vice versa. Après l'affichage des consignes, une phase de familiarisation démarrait. Des exemples d'essais de la

tâche spatiale et de la tâche temporelle ont été présentés aux participants. Ces essais correspondaient à des essais dont la caractéristique à estimer du stimulus était une valeur extrême (la plus petite ou la plus grande distance pour les essais spatiaux, et la plus petite ou la plus grande durée pour les essais temporels). Le but était de familiariser les participants avec ce qui est considéré comme étant une distance/durée "courte" ou une distance/durée "longue". Puis, les participants ont effectué un entraînement spatial et un entraînement temporel (12 essais chacun). La magnitude non-pertinente était fixe pendant les exemples et les entraînements, basée sur la modalité centrale ( $7,2^\circ$  de distance pour les exemples et les entraînements temporels, et 350 ms de durée pour les exemples et les entraînements spatiaux). Chaque essai d'entraînement correspondait à un extrême, et était suivi d'un feedback pour informer le participant en cas de bonne ou de mauvaise réponse. Pour répondre, les participants devaient utiliser les clics gauche et droit du pavé numérique du PC avec la main droite. La moitié des participants devaient cliquer sur le clic gauche pour répondre "courte" et sur le clic droit pour répondre "longue", l'autre moitié des participants avait une configuration inverse. Après les entraînements, un rappel des consignes s'affichait, puis les participants pouvaient effectuer les deux tâches de bissection, dont l'ordre était contrebalancé au travers des participants. Chaque condition expérimentale (5 magnitudes pertinentes, 2 magnitudes non pertinentes et 2 tâches) était répétée 10 fois, il y avait donc au total 200 essais dans les deux blocs expérimentaux réunis.



**Figure 23.** La partie A est une représentation schématique d'un essai. La partie B représente les différentes positions des points en fonction de l'expérience, "condition non demandante en ressource cognitive" pour l'expérience 1 et "condition demandante en ressource cognitive" pour l'expérience 2.

Nos hypothèses étaient que les tâches spatiales et temporelles n'étaient pas équilibrées en termes de difficultés. Ce déséquilibre ne serait pas apparent sur les ratios de Weber mais le serait sur les temps de réaction. On s'attend à ce que les temps de réaction dans la tâche spatiale soient moins élevés que dans la tâche temporelle puisque la demande en ressources cognitives est inférieure. Nous pensons aussi que la variation des distances pendant la tâche temporelle provoquerait une distorsion des estimations temporelles (effet Kappa), et que puisque la tâche spatiale était séquentielle la variation des durées pendant la tâche spatiale pourrait elle aussi provoquer une distorsion des estimations spatiales (effet Tau), mais aussi que l'effet Kappa soit plus important que l'effet Tau, à l'instar des résultats observés dans la littérature.

## Résultats

Le premier résultat à retenir de la première ANOVA sur les ratios de Weber en fonction de la tâche (spatiale/temporelle) et de la magnitude non pertinente (100/600 ms dans la tâche spatiale, et 1,6/12,8° dans la tâche temporelle) est que les ratios de Weber (WR) n'étaient pas significativement différents en fonction de la tâche ( $F(1, 15) = 1.15, p > .05, \eta^2p = .07$ ).

La seconde ANOVA a été effectuée sur les points de bissection (BP) en fonction de la tâche et de la magnitude non pertinente. Celle-ci a mis en évidence un effet principal de la magnitude non pertinente ( $F(1, 15) = 20.48, p < .001, \eta^2p = .58$ ) ainsi qu'un effet d'interaction entre la magnitude non pertinente et la tâche ( $F(1, 15) = 6.32, p = .024, \eta^2p = .30$ ), suggérant que l'effet de la magnitude non pertinente dans la tâche temporelle serait plus important que l'effet de la magnitude non pertinente dans la tâche spatiale (effet Kappa > effet Tau ; voir Figure 24).

Enfin, une troisième ANOVA sur les temps de réaction en fonction de la tâche, de la magnitude pertinente et de la magnitude non pertinente montre un effet principal significatif de la tâche ( $F(1, 15) = 5.67, p = .031, \eta^2p = .27$ ) illustrant que les temps de réaction dans la tâche spatiale sont significativement moins élevés que dans la tâche temporelle (voir Figure 25).

Ainsi, cette expérience réplique les résultats habituellement obtenus dans la littérature. Les ratios de Weber sont équilibrés, l'effet Kappa est plus important que l'effet Tau, et le fait que les temps de réaction diffèrent selon la tâche suggère que la tâche spatiale requiert moins de ressources cognitives que la tâche temporelle.

## 4.2 Résumé de l'expérience 2 - Asymétrie inversée, Tau > Kappa

### Méthode

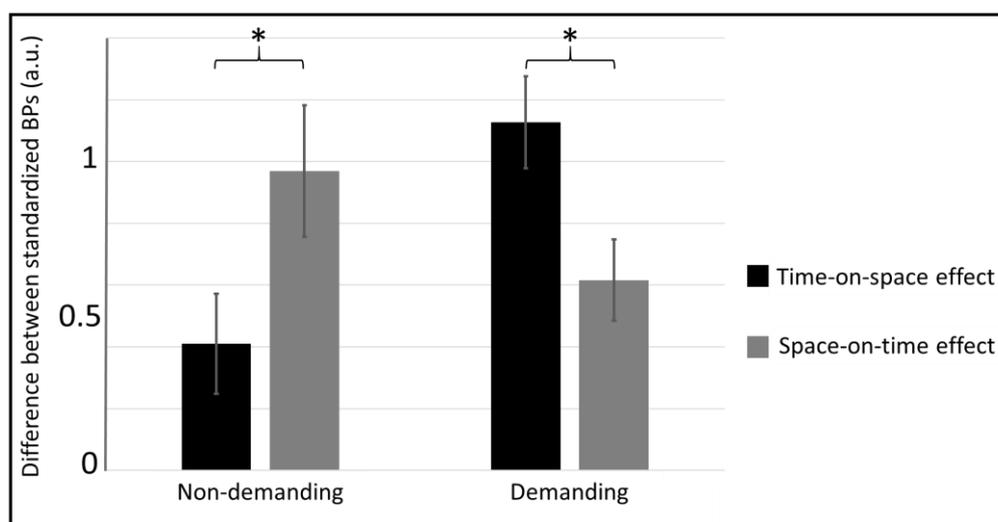
L'objectif de cette expérience était de montrer qu'en équilibrant la demande en ressources cognitives des deux tâches alors l'importance de l'effet Tau pourrait égaler voire surpasser l'importance de l'effet Kappa. Pour cela, nous avons réduit la discriminabilité des distances (voir Figure 23). 36 participants ont donc procédé à cette seconde expérimentation dont le matériel, les dispositifs, les consignes et les procédures étaient rigoureusement identiques à l'expérience 1. La seule différence est que pour cette expérience, les 5 distances

possibles entre les deux points étaient de 3,2°, 3,6°, 4°, 4,4° ou 4,8° (et donc soit 3,2°, soit 4,8° durant la tâche temporelle). Il est important de bien comprendre le paradigme que nous avons utilisé, car nous avons programmé des expériences ayant des paradigmes très similaires à celui-ci lors des expériences suivantes.

## Résultats

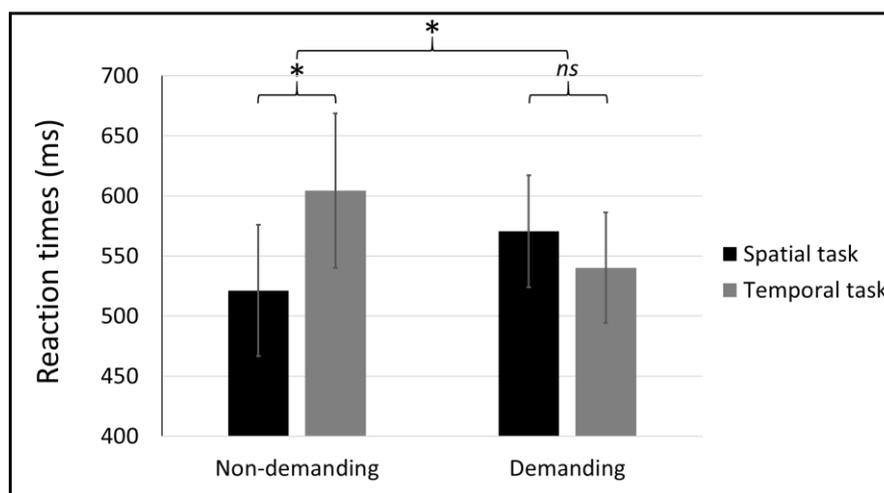
De manière intéressante, la première ANOVA sur les ratios de Weber en fonction de la tâche (spatiale/temporelle) et de la magnitude non pertinente (100/600 ms dans la tâche spatiale, et 1,6/12,8° dans la tâche temporelle) montre que les ratios de Weber (WR) étaient significativement différents en fonction de la tâche ( $F(1, 31) = 90.40, p < .001, \eta^2p = .75$ ). Les ratios de Weber pour la tâche spatiale étaient significativement moins élevés (ce qui sous-tend une meilleure précision) que les ratios de Weber pour la tâche temporelle.

La seconde ANOVA a été effectuée sur les points de bissection (BP) en fonction de la tâche et de la magnitude non pertinente. Celle-ci a mis en évidence un effet principal de la magnitude non pertinente ( $F(1, 31) = 59.20, p < .001, \eta^2p = .66$ ) ainsi qu'un effet d'interaction entre la magnitude non pertinente et la tâche ( $F(1, 31) = 9.56, p = .004, \eta^2p = .24$ ), suggérant cette fois-ci que l'effet de la magnitude non pertinente dans la tâche spatiale serait plus important que l'effet de la magnitude non pertinente dans la tâche temporelle (effet Tau > effet Kappa : voir Figure 24).



**Figure 24.** Représentation de la différence des BP standardisés entre les magnitudes non pertinentes (calculée tel que : "BP standardisé pour la plus courte magnitude non pertinente" - "BP standardisé pour la plus longue magnitude non pertinente"), représentant la force des effets d'interférence, en fonction de la tâche séparément pour la condition "non demandante en ressources cognitives" (expérience 1) et la condition "demandante en ressources cognitives" (expérience 2).

Enfin, la troisième ANOVA sur les temps de réaction en fonction de la tâche, de la magnitude pertinente et de la magnitude non pertinente ne montre pas d'effet principal significatif de la tâche ( $F(1, 31) = 1.23, p = .276, \eta^2p = .038$ ). Ce dernier résultat est particulièrement important dans le sens où il montre que les temps de réactions étaient équivalents dans les deux tâches, suggérant une demande en ressources cognitives équivalente selon les tâches (voir Figure 25).



**Figure 25.** Temps de réaction en fonction de la tâche (spatiale vs. temporelle) séparément pour la condition "non demandante en ressources cognitives" (expérience 1) et la condition "demandante en ressources cognitives" (expérience 2).

Cette expérience démontre qu'équilibrer les tâches en se basant sur la demande en ressources cognitives permet de faire ressortir un effet Tau pouvant aller jusqu'à surpasser l'effet Kappa. Ces résultats sont une première source de preuves concernant la relativité de la force des effets d'interférence espace-temps. En l'état, nos résultats semblent remettre en doute la théorie de la métaphore conceptuelle, sans pour autant appuyer la théorie AToM.

### 4.3 Résumé de l'expérience 3 - Amplification de Tau en intra-sujets

#### Méthode

L'objectif de cette expérience était de montrer qu'il était possible de retrouver cette différence de force de l'effet Tau en fonction de la demande en ressource cognitive de la tâche spatiale, chez un même individu. Pour cela, 20 participants ont effectué une expérimentation similaire aux deux précédentes, sauf qu'au lieu de contenir une tâche de bissection spatiale et une tâche de bissection temporelle, cette expérience contenait la tâche spatiale "non demandante en ressources cognitives" de l'expérience 1, et la tâche spatiale "demandante en

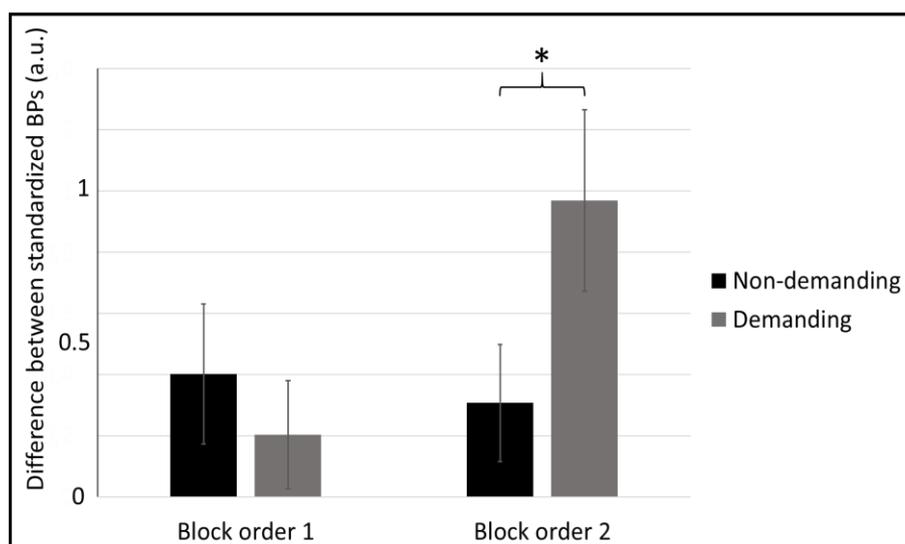
ressources cognitives" de l'expérience 2. Notez qu'il était dit aux participants que l'expérience était composée de 4 blocs présentés dans un ordre aléatoire, 2 blocs spatiaux et 2 blocs temporels, afin de les inciter à bien se concentrer sur les exemples de "durée courte" et de "durée longue". Les consignes leur indiquaient aussi que les magnitudes extrêmes pouvaient changer d'un bloc à l'autre. Ainsi, avant chaque bloc, des exemples de "distance courte, distance longue, durée courte, et durée longue" correspondant aux distances et aux durées du bloc en question leur étaient présentés. Puis, ils étaient invités à effectuer un entraînement de 12 essais avant de démarrer chaque tâche. Les durées étaient toujours soit 100 ms, soit 600 ms. Les distances quant à elles variaient selon le bloc expérimental. Dans le bloc "non demandante en ressources cognitives" les distances possibles étaient 1,6°, 4,4°, 7,2°, 10° ou 12,8°. Dans le bloc "demandante en ressources cognitives" les distances possibles étaient 3,2°, 3,6°, 4°, 4,4° ou 4,8°.

## Résultats

Dans les analyses préliminaires, il n'y avait pas d'effet principal de la magnitude non pertinente, mais un effet principal significatif de variable contrôle "ordre du bloc". Nous avons donc inclus la variable "ordre du bloc" dans les analyses afin de comprendre au mieux les résultats obtenus. Les modalités de cette variable inter-sujets sont au nombre de deux, la modalité Demande croissante pour laquelle les participants effectuaient la tâche spatiale non demandante en ressources cognitives, PUIS la tâche spatiale demandante en ressources cognitives ; et la modalité Demande décroissante dans laquelle les participants commençaient par la tâche spatiale demandante en ressources cognitives, et finissaient avec la tâche spatiale non demandante en ressources cognitives. L'ANOVA sur les ratios de Weber en fonction de l'ordre du bloc (Demande croissante vs. Demande décroissante), de la condition (Non demandante vs. Demandante) et de la magnitude non pertinente (100 ms vs. 600 ms) ne révèle

aucun effet significatif. Les ratios de Weber semblent donc équilibrés entre les deux tâches, et l'ordre du bloc ne joue pas de rôle sur les ratios de Weber ( $F_s(1, 18) < 1$ , *ns*).

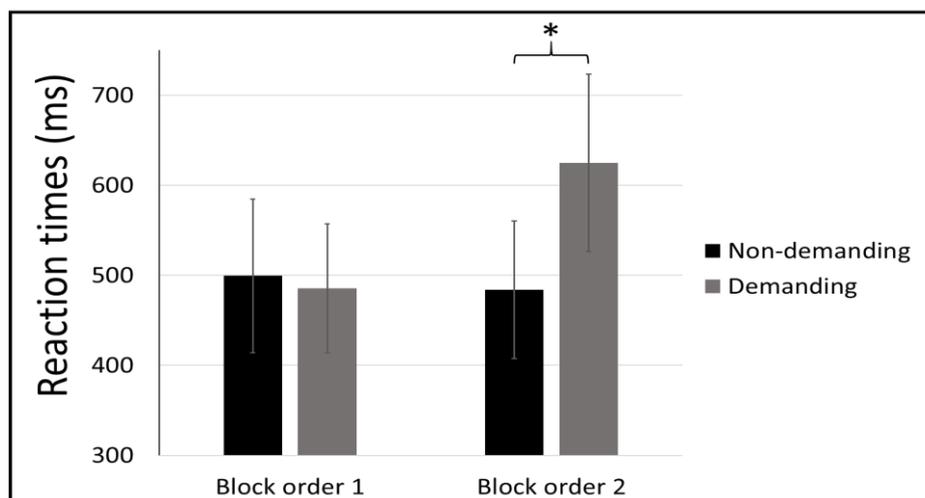
La seconde ANOVA, sur les BP en fonction de l'ordre du bloc, de la condition et de la magnitude non pertinente, montre un effet principal significatif de la magnitude non pertinente ( $F(1, 18) = 10.87$ ,  $p = .004$ ,  $\eta^2p = .38$ ) ce qui illustre la présence de l'effet Tau. En revanche, l'effet d'interaction entre la magnitude non pertinente et le condition n'est pas significatif ( $F(1, 18) = 2.35$ ,  $p = .143$ ,  $\eta^2p = .12$ ). Néanmoins, il y a un effet d'interaction significatif entre la magnitude non pertinente, la condition, et l'ordre du bloc ( $F(1, 18) = 8.11$ ,  $p = .011$ ,  $\eta^2p = .31$ ). Cet effet suggère que la différence de force de l'effet Tau entre la condition Demandante et Non demandante dépendrait de l'ordre du bloc. Afin d'obtenir des précisions, nous avons effectué deux autres ANOVAs sur les BP, l'une avec les participants ayant eu l'ordre Demande croissante, et l'autre avec les participants ayant eu l'ordre Demande décroissante. Les deux ANOVAs étaient des ANOVAs sur les BPs en fonction de la magnitude non pertinente et de la condition. La troisième ANOVA (sur les participants ayant commencé par la tâche non demandante en ressources cognitives) ne révèle rien de significatif (tous les  $F_s < 2.66$ , et  $p_s > .05$ ), mais la 4<sup>ème</sup> ANOVA (sur les participants ayant commencé par la tâche demandante en ressources cognitives) révèle un effet principal significatif de la magnitude non pertinente ( $F(1, 9) = 8.67$ ,  $p = .016$ ,  $\eta^2p = .49$ ), et surtout un effet d'interaction entre la magnitude non pertinente et la condition ( $F(1, 9) = 7.06$ ,  $p = .026$ ,  $\eta^2p = .44$ ). Les résultats sur les BPs suggèrent donc que seuls les participants ayant commencé par la tâche "Demandante en ressources cognitives" ont eu un effet Tau, dont la force était plus importante en condition Demandante qu'en condition Non demandante (voir Figure 26).



**Figure 26.** Représentation de la différence des BP standardisés entre les magnitudes non pertinentes (calculée tel que : "BP standardisé pour 100 ms" - "BP standardisé pour 600 ms"), représentant la force des effets d'interférence, en fonction de la condition de la tâche (Non demandante vs. Demandante), séparément selon l'ordre du bloc ("Block order 1" étant les participants ayant passé l'expérience dans l'ordre "demande croissante", et "Block order 2" étant les participants ayant passé l'expérience dans l'ordre "demande décroissante").

Pour déterminer objectivement la demande en ressources cognitives des tâches, nous avons ensuite effectué une ANOVA sur les temps de réaction, en fonction de l'ordre des blocs, de la condition (Demandante vs. Non demandante), de la magnitude pertinente (les 5 distances possibles) et de la magnitude non pertinente (100 ms ou 600 ms). Cette ANOVA révèle un effet principal de la condition ( $F(1, 18) = 4.63, p = .045, \eta^2p = .21$ ), et un effet d'interaction significatif entre la condition et l'ordre du bloc ( $F(1, 18) = 6.86, p = .017, \eta^2p = .28$ ). Ces résultats, suggérant une différence de demande en ressources cognitives entre les deux tâches qui dépendrait de l'ordre du bloc, nous a poussés à faire des analyses supplémentaires, à l'instar de nos analyses sur les BPs. Nous avons donc effectué des ANOVAs sur les temps de réaction en fonction de la condition, de la magnitude pertinente et de la magnitude non pertinente séparément en fonction de l'ordre des blocs (demande croissante ou décroissante). L'ANOVA réalisée pour l'ordre Demande croissante ne révèle pas d'effet significatif de la condition

( $F(1, 9) < 1$ ), alors que l'ANOVA sur l'ordre Demande décroissante montre, quant à elle, un effet principal de la condition ( $F(1, 9) = 9.72, p = .012, \eta^2 p = .52$ ). Les résultats sur les temps de réaction suggèrent donc que seuls les participants ayant eu la condition de demande décroissante ont eu une différence de temps de réaction entre la tâche Demandante et la tâche Non demandante (voir Figure 27).



**Figure 27.** Temps de réaction en fonction de la condition de la tâche (Non demandante vs. Demandante), séparément selon l'ordre du bloc ("Block order 1" étant les participants ayant passé l'expérience dans l'ordre Demande croissante, et "Block order 2" étant les participants ayant passé l'expérience dans l'ordre Demande décroissante).

Cette expérience s'est avérée extrêmement éclairante, car bien que nous ayons été surpris par l'effet de l'ordre des blocs, cela nous a permis d'obtenir des arguments supplémentaires pour affirmer qu'il est nécessaire d'équilibrer les tâches en fonction de la demande en ressources cognitives. En effet, on remarque que seuls les participants ayant commencé par la tâche Demandante ont significativement dû investir plus de ressources cognitives dans la tâche Demandante que dans la tâche Non demandante. La raison pour laquelle ces résultats sont des arguments supplémentaires solides, est que ceux sont aussi ces mêmes participants qui ont subi un effet Tau plus important en condition Demandante qu'en

condition Non demandante, confirmant ainsi le lien étroit entre l'effet Tau et la demande en ressources cognitives dans les tâches de bissection spatiales.

Ci-dessous est proposée la version originale du manuscrit soumis à la revue *Attention, Perception, and Psychophysics*

Vidaud-Laperrière, K., Brunel, L., Syssau, A., & Charras, P.

Exploring spatiotemporal interactions: On the superiority of time over space (Under Review)

## **Exploring spatiotemporal interactions: On the superiority of time over space**

Kévin Vidaud-Laperrière, Lionel Brunel, Arielle Syssau-Vaccarella & Pom Charras \*

Affiliations: Univ Paul Valéry Montpellier 3, EPSYLON EA 4556, F34000, Montpellier,  
France

\* Corresponding author: [pom.charras@univ-montp3.fr](mailto:pom.charras@univ-montp3.fr)

## Abstract

Space and time mutually influence each other such that space affects time estimation (space-on-time effect), and conversely (time-on-space effect). These reciprocal interferences suggest that space and time are intrinsically linked in the human mind. Yet, recent evidence for an asymmetrical advantage for space over time challenges this theoretical interpretation. In the present study, we tested whether the superiority of space-on-time interference depends on working memory demands in the spatial task. We conducted three experiments in which participants performed temporal and/or spatial bisection tasks in separate blocks. In each trial, two dots were successively flashed at various locations, and participants were to judge whether the duration or distance between the dots were short or long. To manipulate cognitive demands in the spatial task, distances varied across experiments (highly discriminable distances for the “Non-demanding” spatial task in Experiment 1 and scarcely discriminable distances for the “Demanding” spatial task in Experiment 2). Importantly, this manipulation did not affect perceptual sensitivity (as indexed by Weber Ratios) but slowed down the decision process (as indexed by reaction times) in the demanding experiment. Our results clearly show that the involvement of cognitive resources in a demanding spatial task causes a massive time-on-space effect: Spatial judgments are indeed more influenced by irrelevant temporal information than the reverse. Overall, our findings suggest that spatiotemporal interferences are flexible and might have their origins in common mechanisms dedicated to space and time.

Keywords: space-time interference, reaction times, cognitive resources, sensory accumulation, magnitude system

## Introduction

Space and time are intrinsically linked in the visual world. In everyday activities, such as when catching a ball, the cognitive system needs to accurately process spatial distance to anticipate the right location, as well as the temporal interval to predict the moment when one should catch the ball. Efficient processing of both spatial and temporal information on the basis of visual information is crucial to appropriately interact with the surroundings. A theory developed by Walsh (2003 - AToM) suggests that magnitudes such as space, time and number are represented by common processing mechanisms, underlying a generalized magnitude system (also see Buetti & Walsh, 2009, de Hevia, Izard, Coubart, Spelke, & Streri, 2014). Within the AToM framework, one of the major arguments arises from behavioral interactions between spatial, temporal and numerical magnitudes. Numerous studies have provided evidence for spatiotemporal interference. Judgments of stimulus duration or temporal interval between two stimuli are critically influenced by the spatial characteristics of the stimuli (referred to as the space-on-time effect; Cohen, Hansel & Sylvester, 1953). Specifically, the longer the distance, the longer the perceived duration is. Reciprocally, spatial estimates can also be influenced by the temporal characteristics of the stimulus (referred to as the time-on-space effect; Helson, H. & King, 1931) so much so that the longer the duration, the longer the perceived covered distance. The assumption that magnitude interferences are reciprocal and symmetrical is now being challenged as a recent series of studies has found that space modulates temporal estimates, and not the other way around (Casasanto & Boroditsky, 2008; Dormal & Pesenti, 2013; Magnani et al., 2014; Vicario et al., 2008; Xuan et al., 2007, Starr & Brannon, 2016).

Yet, temporal tasks used in this literature are often much more difficult and resource-demanding than spatial ones, thus entailing less precise but effortful judgments. One could wonder whether the ease to accumulate sensory evidence within the spatial or temporal dimension modulates spatiotemporal interference. Differences in cognitive demands across tasks could account for the absence of temporal interference on space. The objective of this paper is to directly test whether and how the working memory (WM) demands during spatial and temporal sensory accumulation impact spatiotemporal interference.

To the best of our knowledge, two decisive criteria have already been put forward to match WM demands engaged in the spatial and temporal experiments, i.e. the need for sensory accumulation and the adjustment of accuracy or precision (see for instance Casasanto &

Boroditsky, 2008; Coull et al., 2015; Magnani et al., 2014; Martin et al., 2017). Time processing –in contrast with other quantities such as space or number– inherently relies on sequential or cumulative information. WM is inevitably involved in timing to accumulate sensory information over time (Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015; Coull & Droit-Volet, 2018). Yet, spatial or numerical information can either be delivered simultaneously or sequentially by using dynamic displays (such as a growing line for instance). When spatial information is provided all at once, the requirement for information accumulation is drastically unbalanced between tasks. Regulating the need for accumulation of sensory information across dimensions has proven to be decisive when investigating commonalities between time, space and even number (see Droit-Volet, 2010; Droit-Volet et al., 2008). Furthermore, in a recent attempt to match cognitive demands across tasks, several studies on space-time interference carefully calibrated stimulus intensities and ratios to obtain similar perceptual thresholds in the spatial and temporal tasks. Since magnitude processing is characterized by the Weber law, according to which accuracy depends on the ratio of the magnitudes to be compared rather than on the absolute intensity difference, researchers assume that experimental tasks are equally difficult whenever Weber ratios –or accuracy– are similar (Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017; Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015).

Yet, recent papers smartly underlined that WRs alone cannot fully characterize the decision process in a magnitude discrimination task given that the temporal dynamics of the decisional process are neglected (Link, 1992, Simen, Vlasov & Papadakis, 2016, Pardo-Vasquez et al., 2019, Brus, Heng & Polania, 2019). Indeed, discriminability can independently affect WRs and RTs (Simen et al., 2016). They suggest incorporating reaction times (RTs) to further define the discrimination process and to inform about task difficulty as well as about the amount of WM resources engaged in a task. In the present study, we revisited spatiotemporal interaction while taking into account the temporal dynamics of the decision process. In three experiments, the manipulation of WM demands in the spatial task, assessed by both WRs and RTs, drastically impacts spatiotemporal interference.

### ***Experiment 1: Non-Demanding Spatial Task***

The goal of Experiment 1 was to replicate the advantage of space over time in spatiotemporal interactions (Casasanto & Boroditsky, 2008; Coull et al., 2015; Magnani et al., 2014; Martin et al., 2017). In two different blocks, participants performed a temporal and spatial bisection task while ignoring irrelevant spatial or temporal information, respectively.

Spatial distances were similar in terms of lengths and ratios to those commonly used in the literature (hereafter referred to as the non-demanding condition –for more details, see the Stimuli and Procedure section). We expected the space-on-time effect to be larger than the time-on-space effect, as already reported in the literature (Casasanto & Boroditsky, 2008, Coull et al., 2015, Cai, Wang, Shen, & Speekenbrink, 2018). Furthermore, WRs and RTs were analyzed. Given the spatial distances used here, we expected the spatial task to be less demanding in terms of cognitive demands than the temporal one. As a consequence, perceptual sensitivity should be higher (lower WRs) and the decision process faster (shorter RTs) in the spatial task.

## Methods

### Participants

A total of 19 participants (including 13 women; 13 right-handed) between 17 and 48 years of age (mean 23.25, standard deviation 8.10) participated in this study. Sample size was determined using effect sizes from previous research examining space-time interference (Starr & Brannon, 2016; effect size  $f = .80$ , with power  $(1 - \beta \text{ err prob}) = .95$ , and  $\alpha = .05$ ), for a main experimental design that has two within-subjects factors and one between-subjects factor (G\*Power, Faul et al., 2007). All the participants, who were recruited from the University Paul Valéry Montpellier (France), gave their written informed consent. The study was carried out under the principles of the Helsinki Declaration and in accordance with the Department of Psychology Ethics Committee guidelines (University Paul Valéry Montpellier). All reported to have normal or corrected-to-normal vision.

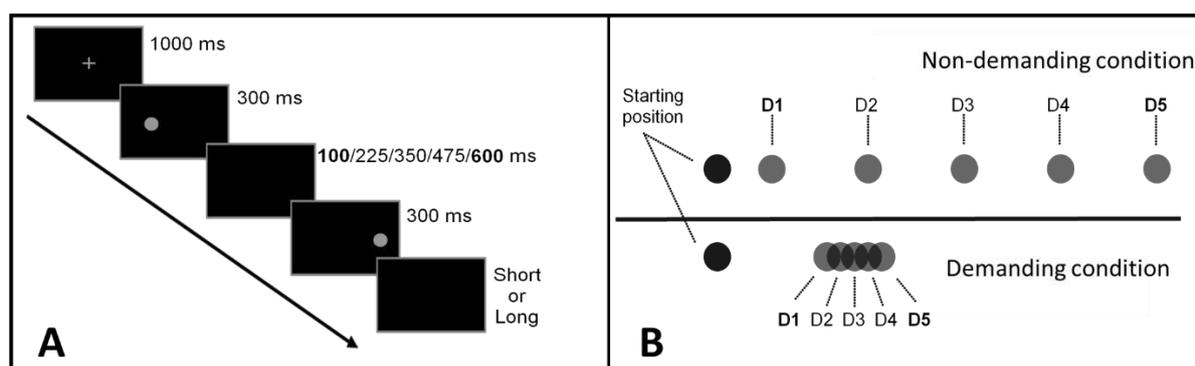
### Apparatus

A PC (Acer Aspire 5742) running E-Prime 2.0 software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) controlled stimulus presentation, timing operations and data collection. Stimuli were presented on a 15.6-inch computer screen (1366 x 768 pixels, 60Hz). Manual responses were collected by clicking on the left and right buttons of the touchpad with the participants' right hand.

### Stimuli and Procedure

Participants were tested individually in a dimly lit room and sat at an approximate distance of 57 cm from the computer screen. All participants were to complete a temporal and spatial bisection task in two consecutive experimental sessions which were counterbalanced between

participants. Every trial started with a fixation cross, subtended a  $0.5^\circ$  visual angle, for 1000ms. Thereafter, two stimulus displays separated by an empty black background were successively flashed. A response display, presenting a grey-colored question mark on a black background, remained on the screen until response within the maximum time limit of 5000ms. While stimulus display presentation was set at 300ms, the duration of the empty black background varied from 100 to 600ms in 5 steps (100, 225, 350, 475 and 600ms). Stimulus display was composed of a grey dot ( $0.8^\circ$  in diameter) displayed on a black background. Dot location was manipulated on the horizontal plane. For the first stimulus display, the dot could be at one out of two possible locations (a left- and a right-sided at  $1.6^\circ$  from the center). So as to manipulate covered distance between the two dots, the second dot could be positioned at 5 possible locations according to the starting position (first dot). The successive presentation of the two dots gave rise to apparent motion percepts, in the sense that the dot seemed to travel either leftward or rightward (see Figure 1).



**Figure 1:** *Panel A* represents a schematic trial design and *Panel B* represents the different dot positions as a function of the experiment: “Non-demanding condition” for Experiment 1, and “Demanding condition” for Experiment 2.

Depending on the bisection task at hand, participants had to judge either the **covered distance** or the **elapsed time** separating the two dots as rather short or long by pressing a response key. Response mapping was counterbalanced between participants. In this experiment, covered distances were clearly distinguishable from one another since dots were separated by  $1.6^\circ$  for the shorter distance and by  $12.8^\circ$  for the longer one ( $2.8^\circ$  gap between consecutive distances;  $1.6^\circ$ ,  $4.4^\circ$ ,  $7.2^\circ$ ,  $10.0^\circ$  and  $12.8^\circ$ ; see Figure 1: Panel B). Participants first received instructions about the experimental tasks and were presented twice with the short and long durations (100 and 600ms) and then twice with the short and long distance ( $1.6^\circ$  vs.  $12.8^\circ$ ). In the second step, participants were familiarized with either the two temporal or the two spatial anchors

depending on session order. Participants performed 12 training trials whose procedure was identical to that of experimental trials, except that feedback was provided (1500ms). For the experimental block, participants were informed that intermediate durations or distances would be inserted. As a result, they were to judge whether the current duration or distance between the dots was closer to the shorter or longer anchors previously learned.

To elicit time-space interference during the spatial task in which 5 distances were judged (relevant dimension), the elapsed time between dots was also manipulated (referred to as the irrelevant dimension here). Two temporal anchors were used, so that a 100 or 600ms gap separated the two dots. Conversely, when elapsed time was relevant to the task (temporal bisection task), two irrelevant distance anchors were used to produce space-on-time interference ( $1.6^\circ$  vs.  $12.8^\circ$ ). Each of the separate spatial and temporal bisection tasks consisted of one block of 100 trials. The relevant dimension was divided in 5 levels (5 distances in the spatial task and 5 durations in the temporal task) and the irrelevant dimension in 2 levels (2 durations in the spatial task and 2 distances in the temporal task). Every experimental condition was repeated 10 times within a block. Participants therefore completed 24 training trials and 200 experimental trials.

### Data Analyses

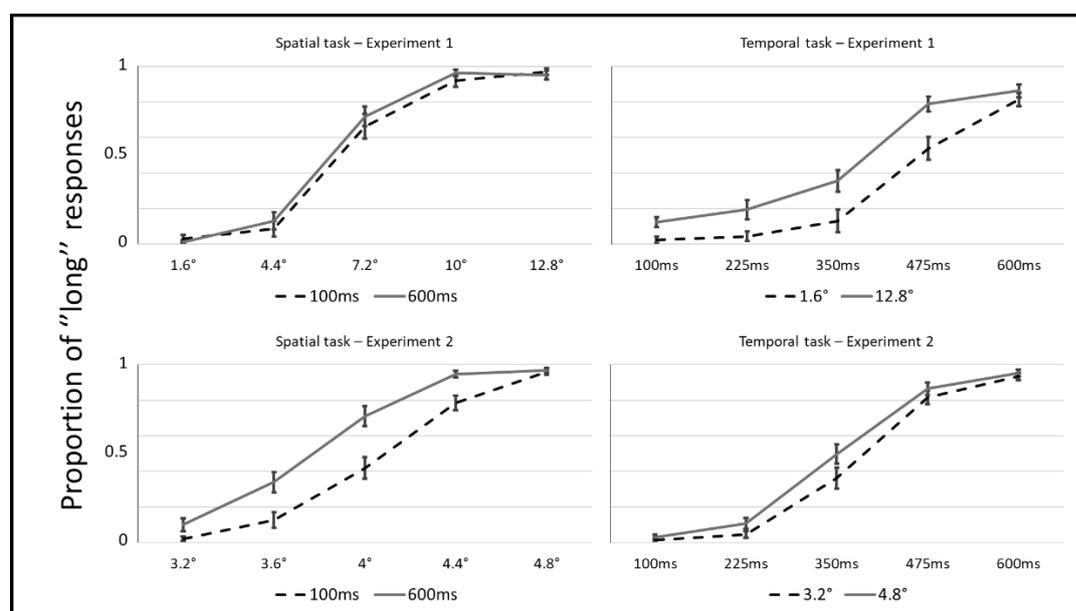
In the three experiments reported here, we collected the proportion of “long” responses ( $P(\text{long})$ ) and mean reaction times (RTs) for each participant. To further explore potential perceptual distortions, bisection points (also referred to as the point of subjective equality) were computed from the  $P(\text{long})$  data. Indeed, to further analyze interference effects in the three experiments, we calculated the bisection point (hereafter BP) for each participant in every experimental condition. Each BP value was calculated from a slope and an intercept, obtained by fitting the psychometric raw data with the *Pphy* package on R (R Core Team, 2014). *Pphy* is an R package that uses the *modelfree* package to obtain a “per subject local linear fitting” (Zychaluk & Foster, 2009), which was included as a random effect to account for the repeated-measure nature of the design as well as individual differences in response scale use. The slope, the bisection point and the JND (just-noticeable difference) were extracted per subject and condition. BP represents the theoretical value in which the probability to judge a distance or duration as being long is 0.5. A low BP value refers to an overestimation, and a high BP value to an underestimation. In Experiments 1 and 2, given that participants performed two tasks (spatial and temporal) and were presented with 2 irrelevant magnitudes (2 durations for the

spatial task and 2 distances for the temporal task), four BP values were calculated for each participant (2 Tasks x 2 Irrelevant magnitudes). To analyze and compare irrelevant magnitude (space-on-time and time-on-space effects), BP values were standardized per condition and task. In Experiment 3, the participants only performed a spatial task while distance discriminability was manipulated. Four BP values were calculated for each participant given the two “discriminability” conditions (non-demanding and demanding) and the 2 irrelevant temporal magnitudes. BP values were standardized per condition to lay stress on the effect of irrelevant magnitude (i.e. time-on-space effect).

Additionally, to assess perceptual sensitivity, Weber Ratios (WRs) were computed separately for the spatial and temporal tasks in the three experiments. As mentioned in the Introduction, WRs index perceptual sensitivity. It is computed by dividing the just-noticeable difference (JND) by the bisection point (BP).

## Results

The data from 3 participants were removed from statistical analyses due to extremely low performance on the anchors (shorter and longer durations or distances). The final sample included 16 participants.



**Figure 2** shows the proportions of “long” responses as a function of Relevant magnitude, Irrelevant magnitude, and Task (Spatial task in the left part; temporal task in the right part) separately for the non-demanding condition (Experiment 1, upper part) and the demanding condition (Experiment 2, lower part).

To explore perceptual sensitivity, we performed a repeated measures ANOVA on the WRs with the variables “Task” (Spatial, Temporal) and Irrelevant magnitude (short or long

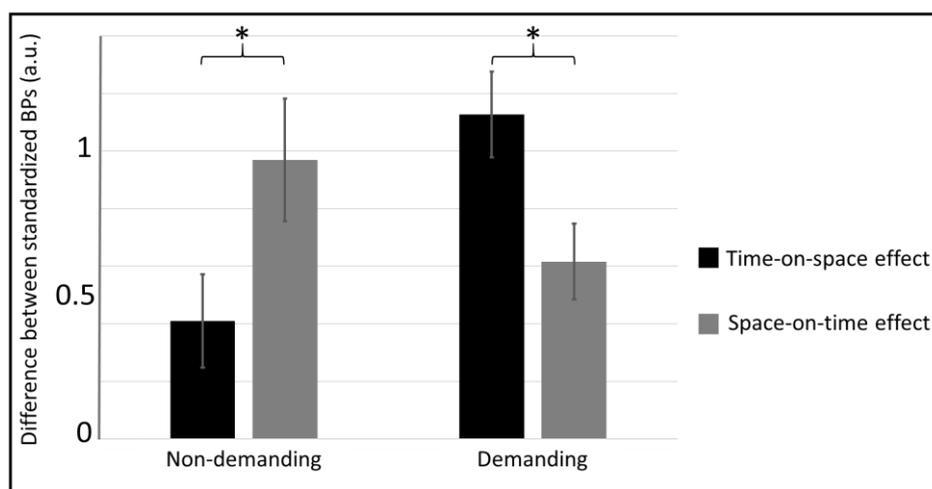
distance/duration, depending on the task) manipulated within participants. This analysis showed a main effect of Irrelevant magnitude ( $F(1, 15)=11.21, p=.004, \eta^2p=.43$ ), but no significant main effect of Task ( $F(1, 15)=1.15, p>.05, \eta^2p=.07$ ). The interaction Task x Irrelevant magnitude was significant ( $F(1, 15)=12.47, p=.003, \eta^2p=.45$ ), suggesting that WRs increased in the temporal task when travelled distance was long. These results suggest that WRs were not fully similar in the two tasks, with a slight advantage for the spatial task (see Table 1).

**Table 1** presents the mean bisection points, Weber ratios, and standardized bisection points as a function of the Experiment (“Non-demanding Experiment” referring to Experiment 1 vs. “Demanding Experiment” referring to Experiment 2), the Task and the Irrelevant magnitude. Weber ratios represent the ratio of the just-noticeable variation to the initial stimuli intensity.

Experiment	Task	n	Irrelevant magnitude	Bisection Point		WR		Standardized BP	
				Mean	(SE)	Mean	(SE)	Mean	(SE)
Non-demanding	Spatial Task	(n=16)	100ms	67	(3.10)	0.17	(0.074)	0.205	(0.27)
			600ms	63	(2.74)	0.16	(0.063)	-0.205	(0.24)
	Temporal Task	(n=16)	1.6°	471	(21.72)	0.14	(0.021)	0.485	(0.23)
			12.8°	378	(21.66)	0.31	(0.041)	-0.485	(0.23)
Demanding	Spatial Task	(n=32)	100ms	41	(2.47)	0.05	(0.053)	0.564	(0.19)
			600ms	38	(2.32)	0.06	(0.045)	-0.564	(0.19)
	Temporal Task	(n=32)	3.2°	389	(16.10)	0.15	(0.016)	0.308	(0.16)
			4.8°	355	(15.90)	0.18	(0.028)	-0.308	(0.17)

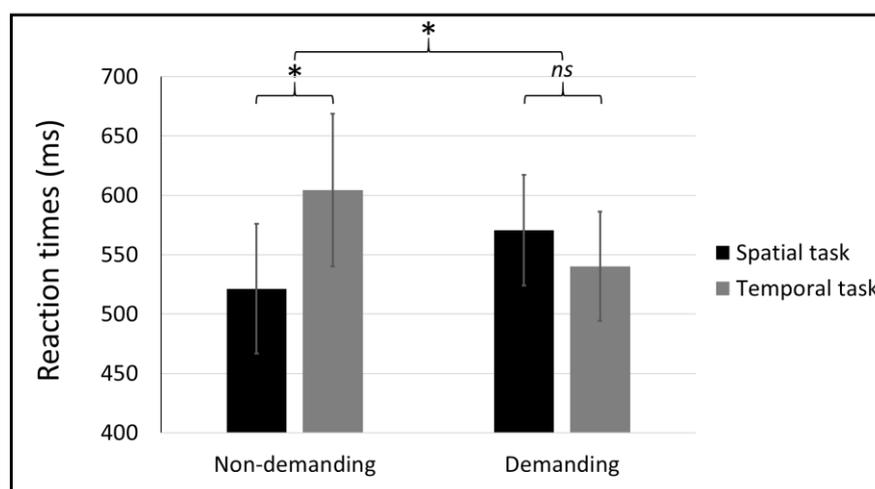
To test spatiotemporal interferences, we then performed a repeated measures ANOVA on the standardized BP value, with the variables “Task” (Spatial and Temporal) and “Irrelevant magnitude” (short or long distance/duration, depending on the task) manipulated within participants<sup>1</sup>. The results showed a main effect of Irrelevant magnitude ( $F(1, 15)=20.48, p<.001, \eta^2p=.58$ ) and, as expected, a significant interaction Irrelevant magnitude x Task ( $F(1, 15)=6.32, p=.024, \eta^2p=.30$ ), revealing that the space-on-time effect was higher than the time-on-space effect (see Figure 3).

<sup>1</sup> As BPs were standardized per task, the main effect of Task was disregarded.



**Figure 3** shows the difference of standardized BP values between Irrelevant magnitudes (“Standardized BP value for Irrelevant 1” - “Standardized BP value for Irrelevant 5”), representing the strength of interference effects as a function of the Task separately for the non-demanding and demanding experiments, Experiments 1 and 2, respectively.

Lastly, we performed a repeated measures ANOVA on the mean RTs with the variables “Task” (Spatial, Temporal), and Irrelevant magnitude (the 2 levels of distance or duration, depending on the task) manipulated within participants. This analysis revealed a significant main effect of Task ( $F(1, 15)=5.67, p=.031, \eta^2p=.27$ ). Participants were significantly faster to judge spatial distances than temporal intervals (see Figure 4). This analysis also revealed significant effects of Relevant magnitude and Irrelevant magnitude (both  $F_s>13.70$ , and  $p_s<.001$ ), and significant interactions between Task and Relevant magnitude, and between Relevant magnitude and Irrelevant magnitude (both  $F_s>4.21$ , and  $p_s<.05$ ).



**Figure 4** shows the reaction times as a function of the Task (Spatial vs. Temporal) separately for the non-demanding and demanding experiments (Experiment 1 and 2, respectively).

### Conclusion of Experiment 1

As expected, spatial irrelevant information modulated temporal judgments to a larger extent than the reverse. This finding confirms the advantage of space over time. However, the analyses on WRs and RTs provide evidence for a substantial mismatch in terms of cognitive demands between the temporal and spatial tasks. WM demands are clearly lower in the spatial compared to the temporal task, as suggested by the WRs and RTs.

### ***Experiment 2: Demanding Spatial Task***

The aim of Experiment 2 was to enhance cognitive demands in the spatial task to further explore spatiotemporal interactions. The spatial task difficulty was greatly increased by manipulating distances (see Procedure for a detailed description and Figure 1), while temporal intervals remained unchanged. It should be noted that a number of studies have already attempted to equate difficulty in spatial and temporal tasks, but the authors usually opted to lower difficulty in the temporal task (Coull et al., 2015, but see Homma & Ashida, 2019 in the General Discussion). Increasing difficulty in the spatial task by reducing the gap between distances aimed to break processing automaticity of spatial information (Dormal & Pesenti, 2012); hence, the time required to efficiently process spatial distances should increase. Our objective was to test the strength of time-on-space interference in the context of a demanding spatial task.

### Methods

#### Participants

A total of 36 participants (including 18 women; 32 right-handed) between 18 and 42 years of age (mean 21.97, standard deviation 4.98) participated in this study. Nineteen performed in the “Non-demanding” condition, and thirty-six performed it in the “Demanding” condition. Sample size was determined using effect sizes from previous research examining space-time interference (Starr & Brannon, 2016; effect size  $f = .80$ , with power  $(1 - \beta \text{ err prob}) = .95$ , and  $\alpha = .05$ ), for a main experimental design that has two within-subjects factors and one between-subjects factor (G\*Power, Faul et al., 2007). All the participants, who were recruited from the University Paul Valéry Montpellier (France), gave their written informed consent. The study was carried out under the principles of the Helsinki Declaration and in accordance with the Department of Psychology Ethics Committee guidelines (University Paul Valéry Montpellier). All reported to have normal or corrected-to-normal vision.

## Apparatus

A PC (Acer Aspire 5742) running E-Prime 2.0 software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) controlled stimulus presentation, timing operations and data collection, as in Experiment 1.

## Stimuli and Procedure

Stimuli and procedure were identical to those of Experiment 1, except that a 0.4° gap was set between two consecutive distances, so that the shorter distance covered 3.2° and the longer 4.8° (3.2°, 3.6°, 4.0°, 4.4°, and 4.8°); see Figure 1: Panel B). Furthermore, in the temporal bisection task, the two irrelevant distance anchors used to produce space-on-time interference were of 3.2° and 4.8° for the shorter and the longer distances, respectively.

## Results

The data from 4 participants were removed from statistical analyses due to extremely low performance on the anchors (shorter and longer durations or distances). The final sample included 32 participants. Statistical analyses similar to those of Experiment 1 were conducted. To test perceptual sensitivity, we performed a repeated measures ANOVA on the WRs with the variables “Task” (Spatial, Temporal) and Irrelevant magnitude (the 2 levels of distance or duration, depending on the task) manipulated within participants. It showed main effects of Irrelevant magnitude and of Task ( $F(1, 31)=6.35, p=.017, \eta^2p=.17$  and  $F(1, 31)=90.40, p<.001, \eta^2p=.75$ , respectively), but no significant Task x Irrelevant magnitude interaction ( $F(1, 31)=2.80, p>.05, \eta^2p=.08$ ). These results show lower WRs in the spatial task, thus indicating that spatial judgments were more precise than temporal ones (see Table 1). Importantly, reducing the gap between distances did not entail a decline in perceptual sensitivity in the spatial task.

To further analyze interference effects, we performed a repeated measures ANOVA on the standardized BP value, with the variables “Task” (Spatial, Temporal) and Irrelevant magnitude (the 2 levels of distance or duration, depending on the task) manipulated within participants. As BPs were standardized per condition and task, we only report the main effect or interaction related to Irrelevant Magnitude. The results show a main effect of Irrelevant magnitude ( $F(1, 31)=59.20, p<.001, \eta^2p=.66$ ) and, as predicted, a significant interaction effect of Irrelevant magnitude x Task ( $F(1, 31)=9.56, p=.004, \eta^2p=.24$ ), revealing that the time-on-space effect is higher than the space-on-time effect (see Figure 3).

Finally, we performed a repeated measures ANOVA on the mean RTs with the variables “Task” (Spatial, Temporal) and Irrelevant magnitude (the 2 levels of distance or duration, depending on the task) manipulated within participants. This analysis revealed a main effect of Relevant magnitude ( $F(4, 124)=23.91, p< .001, \eta^2p=.44$ ) and significant Task x Relevant magnitude as well as Relevant magnitude x Irrelevant magnitude interactions (both  $F_s>4.66$ , and  $p_s< .05$ ). But more importantly, we found no significant effect of Task ( $F(1, 31)=1.23, p=.276, \eta^2p=.038$ ), thus suggesting that mean RTs were similar to judge spatial distances and temporal intervals (see Figure 4).

### Conclusion of Experiments 1 and 2

The results of Experiment 2 show that by increasing the cognitive demands in the spatial task, the time-on-space effect can be higher than the space-on-time effect. To our knowledge, this is the first piece of evidence for a superiority of time-on-space interference in the visual modality. In order to directly compare Experiment 1 and 2, we conducted 3 ANOVAs including the 48 participants, with the variable “Experiment” (“Non-demanding Experiment” referring to Experiment 1 vs. “Demanding Experiment” referring to Experiment 2) manipulated between participants, the variables “Task” (Spatial, Temporal) and Irrelevant magnitude (the 2 levels of distance or duration, depending on the task) manipulated within participants.

A repeated measures ANOVA on the WRs revealed significant main effects of Task, of Experiment and of Irrelevant magnitude, as well as significant interactions between Task and Irrelevant magnitude; between Irrelevant magnitude and Experiment and a significant interaction effect of Task x Irrelevant magnitude x Experiment (all  $F_s>10.27$ , and  $p_s< .011$ ), but no significant effect of Task x Experiment ( $F(1, 46)=1.48, p=.230, \eta^2p=.03$ ).

For the repeated measures ANOVA on the standardized BP value, the results showed a main effect of the Irrelevant magnitude ( $F(1, 46)=65.34, p< .001, \eta^2p=.58$ ), and no significant Irrelevant magnitude x Experiment interaction ( $F(1, 46)=0.88, p=.35, \eta^2p=.02$ ) neither significant Irrelevant magnitude x Task interaction ( $F(1, 46)=0.03, p=.87, \eta^2p=.001$ ), but as predicted, the Experiment x Task x Irrelevant interaction was highly significant ( $F(1, 46)=14.42, p< .001, \eta^2p=.24$ ). Planned comparisons were then conducted to directly test our hypotheses. The planned comparisons conducted in the non-demanding and demanding experiments for both tasks revealed significant Space-on-time and Time-on-space effects in the non-demanding Experiment ( $F(1, 46)=24.67, p< .001$  and  $F(1, 46)=4.40, p=.04$ , respectively; see Figure 4). In the demanding Experiment, the Space-on-time and Time-on-space effects were also highly significant ( $F(1, 46)=19.90, p< .001$  and  $F(1, 46)=66.58, p< .001$ ,

respectively; see Figure 4). Finally, to examine the flexibility of the Space-on-time and Time-on-space effects, Bonferroni post-hoc tests revealed that the Time-on-space effect was larger in the demanding than in the Non-demanding Experiment ( $p=.02$ ); and, more importantly, an additional post-hoc confirmed that the Time-on-space effect was larger than the Space-on-time effect in the demanding Experiment ( $p=.02$ ).

Finally, the repeated measures ANOVA on the mean RTs revealed significant main effects of Relevant magnitude and of Irrelevant magnitude (both  $F_s > 15.69$ , and  $p_s < .001$ ), significant interactions (all  $F_s > 2.59$ , and  $p_s < .05$ ). Importantly, the interaction between Task and Experiment ( $F(1, 46) = 6.06$ ,  $p = .018$ ,  $\eta^2 p = .116$ ) suggesting that the gap between the spatial and temporal tasks was overcome in Experiment 2 (see Figure 4).

Overall, these analyses suggest that while participants were able to accurately judge spatial distances and temporal intervals, performance was clearly influenced by irrelevant magnitude (time and space, respectively). In Experiment 1, we replicated the classical pattern of magnitude interferences, with a sharp advantage of space over time. But this pattern reversed in Experiment 2 when the spatial task became demanding. Time did modulate spatial estimates, and to a larger extent than did space on time. Critically, time-on-space interference depends on WM demands in the spatial task. The size of spatiotemporal interactions might rely on the gradient of automaticity, as suggested by Dormal & Pesenti (2012).

### Experiment 3: Flexible Time-On-Space Interference

In the following experiment, the gap between distances varied in a within-participant design to directly test the flexibility of time-on-space interference (instead of the between-participant design used in Experiments 1 and 2). Participants performed a demanding and a non-demanding spatial block (or the other way around given that block order was counterbalanced across participants). To assess time-on-space interference<sup>2</sup>, BPs were analyzed; and to figure the resources engaged in the task, we also analyzed WRs and RTs. Our objective was to provide evidence that for a given participant, time-on-space interference could be flexible and depends on the WM resources engaged in the spatial task.

## Methods

### Participants

---

<sup>2</sup> Participants only performed spatial judgments in Experiment 3.

A total of 20 participants (including 13 women; 16 right-handed) between 17 and 39 years of age (mean 25.50, standard deviation 4.78) participated in this study. All the participants, who were recruited from the University Paul Valéry Montpellier (France), gave their written informed consent. The study was carried out under the principles of the Helsinki Declaration and in accordance with the Department of Psychology Ethics Committee guidelines (University Paul Valéry Montpellier). All reported to have normal or corrected-to-normal vision.

### Apparatus

A PC (Acer Aspire 5742) running E-Prime 2.0 software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) controlled stimulus presentation, timing operations and data collection. Stimuli were presented on the computer 15.6-inch screen, 1366 x 768 pixels (60Hz). Manual responses were collected by clicking on the left and right buttons of the touchpad with the participants' right hand.

### Stimuli and Procedure

Stimuli were identical to those used in Experiments 1 and 2. The procedure was also highly similar, except that participants only performed spatial judgments. Distances varied across blocks, corresponding to the non-demanding condition (Experiment 1) or to the demanding condition (Experiment 2). To resemble as much as possible Experiments 1 and 2, participants were told that the experiment consisted of a series of spatial and temporal blocks presented in mixed order. Participants were informed that reference durations and distances (the shorter and longer ones) may change across blocks. Each spatial block was preceded by the related instructions and training.

### Results

As preliminary analyses show no significant Condition effect but a tremendous Block order effect, we decided to include this factor in the statistical analyses.

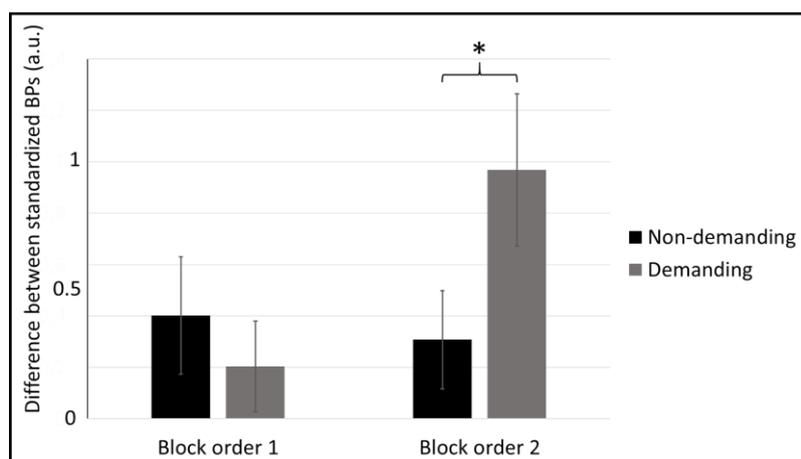
We performed a repeated measures ANOVA on the WRs, with the factor Block order ("Non-demanding, then Demanding" and "Demanding, then Non-demanding") manipulated between participants, and the variables Condition (Non-demanding vs. Demanding) and Irrelevant magnitude (100ms and 600ms) manipulated within participants. Importantly, this analysis revealed neither a significant effect of Condition nor a significant Condition x Block order

interaction (both  $F_s(1, 18) < 1$ ). The effect of Irrelevant magnitude reached significance ( $F(1, 18) = 4.93, p = .039, \eta^2 p = .22$ ), confirming that WRs are lower for the short duration.

**Table 2** presents mean bisection points, Weber ratios and standardized bisection points as a function of Block order, Condition and Irrelevant magnitude.

Bloc order	Condition	n	Irrelevant magnitude	Bisection Point		WR		Standardized BP	
				Mean	(SE)	Mean	(SE)	Mean	(SE)
Non-demandina then Demandina	Non-demandina	(n=10)	100ms	72	(5.29)	0.07	(0.032)	0.437	(0.35)
			600ms	66	(3.20)	0.11	(0.023)	0.035	(0.21)
	Demandina	(n=10)	100ms	40	(1.00)	0.07	(0.004)	0.204	(0.39)
			600ms	39	(0.77)	0.07	(0.009)	0	(0.30)
Demandina then Non-demandina	Non-demandina	(n=10)	100ms	64	(4.26)	0.05	(0.019)	-0.082	(0.28)
			600ms	60	(5.67)	0.09	(0.037)	-0.390	(0.38)
	Demandina	(n=10)	100ms	40	(0.59)	0.06	(0.011)	0.382	(0.23)
			600ms	38	(0.75)	0.07	(0.010)	-0.586	(0.29)

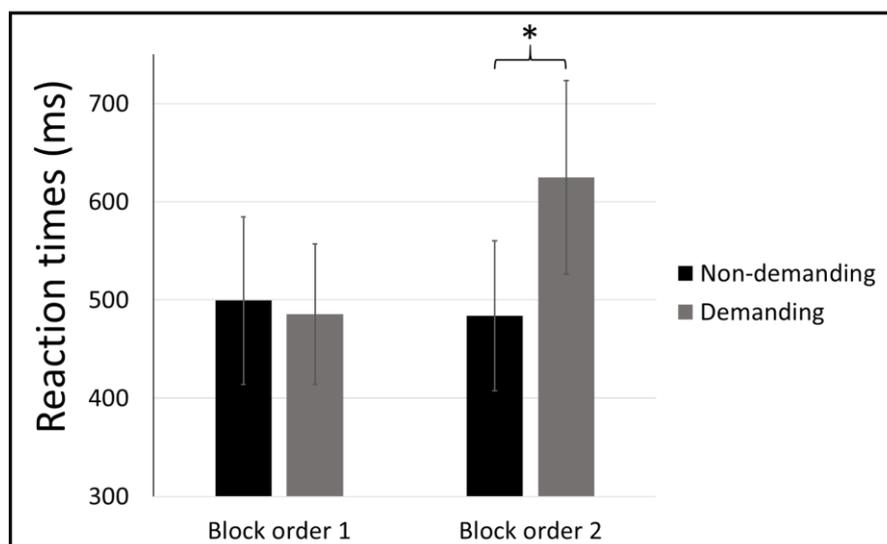
To analyze time-on-space interference, we performed a repeated measures ANOVA on the standardized BP values (see the “Data analysis” section of Experiment 1 for further details on the procedure), with the factor Block order (“Non-demanding, then Demanding” and “Demanding, then Non-demanding”) manipulated between participants, and the variables “Condition” (Non-demanding and Demanding) and “Irrelevant magnitude” (100ms and 600ms) manipulated within participants. The results showed a main effect of Irrelevant magnitude ( $F(1, 18) = 10.87, p = 0.004, \eta^2 p = .38$ ), but no significant Irrelevant magnitude x Condition interaction ( $F(1, 18) = 2.35, p = .143, \eta^2 p = .12$ ). However, the Irrelevant magnitude x Condition x Block order interaction was significant ( $F(1, 18) = 8.11, p = .011, \eta^2 p = .31$ ), suggesting that time-on-space interference depends on Condition and Block order. Separate ANOVAs revealed no significant effect or interaction (all  $F_s < 2.66$ , and  $p_s > .05$ ) for the “Non-demanding, then Demanding” order, but it revealed a significant effect of Irrelevant magnitude ( $F(1, 9) = 8.67, p = .016, \eta^2 p = .49$ ), as well as a Condition x Irrelevant magnitude interaction ( $F(1, 9) = 7.06, p = .026, \eta^2 p = .44$ ) for “Demanding, then Non-demanding” order. Overall, these results suggest that time-on-space interference was much stronger in the demanding condition, if and only if participants started with this block (demanding, then non-demanding order) (see Figure 5).



**Figure 5** shows the difference of standardized BP values between Irrelevant magnitudes (“Standardized BP value for Irrelevant 1” – “Standardized BP value for Irrelevant 5”), representing the size of time-on-space interference as a function of Condition (non-demanding - demanding) separately for “Block order 1” (non-demanding condition, then demanding condition) and “Block order 2” (demanding condition, then non-demanding condition).

Finally, we performed a repeated measures ANOVA on (RTs), with the factor “Block order” manipulated between participants, and the variables “Condition” (Non-demanding vs. Demanding), “Relevant magnitude” (the 5 levels of distance, depending on the condition) and “Irrelevant magnitude” (100ms and 600ms) manipulated within participants. This analysis showed a main effect of Condition ( $F(1, 18)=4.63, p=.045, \eta^2p=.21$ ) and a significant Condition x Block order interaction ( $F(1, 18)=6.86, p=.017, \eta^2p=.28$ ), suggesting that RTs depend on Block order. It also revealed a main effect of Relevant magnitude ( $F(4, 72)=30.30, p<.001, \eta^2p=.63$ ) and a significant interaction between Condition and Relevant magnitude ( $F(4, 72)=3.95, p=.006, \eta^2p=.18$ ).

We thus conducted separate ANOVAs for each block. For the “Non-demanding, then Demanding” order, the results revealed a main effect of Relevant magnitude ( $F(4, 36)=13.79, p<.001, \eta^2p=.63$ ) and a significant interaction Condition x Relevant magnitude ( $F(4, 36)=3.67, p=.013, \eta^2p=.29$ ), but no significant effect of Condition ( $F(1, 9)<1$ ). For the “Demanding, then Non-demanding” order, the analysis revealed a main effect of Relevant magnitude ( $F(4, 36)=18.62, p<.001, \eta^2p=.67$ ) but, more importantly, a main effect of Condition ( $F(1, 9)=9.72, p=.012, \eta^2p=.52$ ). The results indicated that RTs are similar in the two conditions when participants first completed the “Non-demanding” condition, but significantly differ when participants started with the “Demanding” condition. The decision process for spatial judgments was much slower in the demanding condition when this block was delivered first (see Figure 6).



*Figure 6 shows the reaction times as a function of the Condition separately for the “non-demanding, then demanding” and the “demanding condition, then non-demanding” groups.*

### Conclusion of Experiment 3

This experiment illustrates the flexibility of time-on-space interference. When individuals perform a demanding spatial task, whose difficulty is indexed by RTs, their perceptual judgments are biased by irrelevant temporal information. As revealed by the pattern of space-time interferences as a function of block order, time-on-space interference is clearly linked to the cognitive demands engaged in the spatial task, rather than to perceptual sensitivity per se.

### General Discussion

In the present study, we aimed to investigate spatiotemporal interactions. We hypothesized that the advantage of space over time repeatedly observed in the literature is caused by the low WM demands in the spatial task. Experiment 1 provided evidence for a large advantage of space over time in spatiotemporal interference. However, both WRs and RTs data suggested that the spatial task was not as demanding as the temporal one. In Experiment 2, the gap between distances was reduced for the purpose of driving participants to engage WM resources, without adversely affecting perceptual sensitivity. Spatial WRs were indeed excellent but RTs much longer, suggesting that the automaticity of spatial processing was hindered. Interestingly, in this context, time did modulate spatial estimates, and to a larger extent than space did space on time (Time-on-space > Space-on-time). Overall, this study provides evidence for flexible spatiotemporal interferences, that can even be expressed as a superiority of time over space in

specific contexts. Spatial and temporal tasks have to be balanced in terms of perceptual and cognitive demands so as to explore spatiotemporal interferences. Accuracy and precision can be indexed with WRs, among others, and cognitive demands have to be indexed with RTs. This study reports the first piece of evidence that RTs in a spatial or temporal judgment task inform about the WM demands at hand.

The vast majority of recent studies on space-time interaction suggest that temporal information does not substantially interfere with spatial (or numerical) estimates (Cai, Connell & Holler, 2013; Casasanto & Boroditsky, 2008; Dormal & Pesenti, 2013; Xuan et al., 2007; Coull et al., 2015, Zito et al, 2015, Casasanto et al., 2010, Merritt et al., 2010, Bottini & Casasanto, 2013; Xue et al., 2014; for a review, see Loeffler, et al., 2018). Asymmetrical mapping of space-time interaction was supported by the Conceptual Metaphor theory (Lakoff & Johnson, 1980; 1999; Boroditsky, 2000, Casasanto & Boroditsky, 2008). However, the flexibility of spatiotemporal interactions highlighted here, in the visual modality, clearly questions the relevance of the Conceptual Metaphor Theory. This proposal had already been undermined by evidence for unbalanced or unidirectional influence of time in the haptic or auditory modalities (Cai & Connell, 2015), and by investigating temporal influence on numerosity (Lambrechts, Walsh & van Wassenhove, 2013, Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017, Tsouli, Dumoulin, te Pas, van der Smagt, 2018).

In parallel, theoretical models based on imputed velocity have been put forward to account for spatiotemporal interference. Given that from daily experience, observers have expectancies about “moving” objects, two objects, albeit spatially and temporarily separated, are often perceived as a single moving object (apparent motion; Collyer, 1977; Jones & Huang, 1982). Space-time interferences (Kappa and Tau effects) are usually adequately explained by imputed velocity, but this interpretation does not hold for our results. The imputed velocity hypothesis predicts larger time-on-space effects for larger absolute distances and yet we observed here the opposite result here. In the “demanding” condition (Exp. 2 and 3), as spatial distances were physically shorter than those used in the “non-demanding” condition (Exp. 1 and 3), apparent velocity should decrease and result in a decline of the time-on-space effect (Henry & McAuley, 2009a, Henry & MacAuley, 2009b, Reali, Lleras & Alviar, 2019; also see Goldreich, 2007, for other “speed-based” interpretation). Yet, in sharp contrast with such a prediction, time-on-space effect was significantly larger in the demanding condition.

To further discuss the nature and the locus of time-on-space interference, we expose what are in our opinion the two necessary criteria for this effect to occur. **The first criterion is to disrupt the automaticity of spatial processing, fostered by the visual modality.** Cai & Connell (2015) stressed the role of perceptual acuity and modality-specific processing on space-time interferences (for a review, see Loeffler, Canal-Bruland, Schroeger, Tolentino-Castro & Raab, 2018). Using the haptic modality, they demonstrated that irrelevant temporal information could markedly bias spatial judgments and argued that the ability to represent spatial and temporal magnitude depends on the sensory modality. The perceptual acuity issue has also been addressed in the literature using the visual modality (Homma & Ashida, 2015; also see DeWind, Adams, Platt & Brannon, 2015; Ernst & Banks, 2002). Homma and Ashida (2015) claimed that the saliency of spatial information is responsible for the superiority of the Space-on-time effect. By manipulating the saliency and difficulty of both tasks, they pointed up the flexibility of spatiotemporal interferences. Nonetheless, space consistently affected time more than the reverse (but see Homma & Ashida, 2019<sup>3</sup>). In our opinion, Homma and Ashida (2015, 2019) hardly encountered asymmetric effects of time on space because accumulation of sensory information was not required in their spatial task –they used static lines of different lengths. **The second essential criterion for observing time-on-space interference might be the involvement of the accumulation process in spatial judgments,** as already evidenced in the literature (see Droit-Volet, 2010; Droit-Volet et al., 2008). Spatial information needs to be delivered sequentially to maximize the time-on-space effect, therefore suggesting that interference rather occurs during the accumulation process which is intrinsically linked to resources in working memory.

A couple of very recent studies looked further into the issue of magnitude interferences and suggest that space-time interactions occur at a memory stage (Cai et al., 2018; also see Wang & Cai, 2017). In a series of experiments, participants were asked to simultaneously process spatial and temporal information conveyed by visual stimuli, and then to make judgments on either temporal, spatial or both information. Their results clearly demonstrate that space is prone to temporal interference as a result of memory interference. They propose a Bayesian model whereby memory noise plays a critical role in the susceptibility to interferences (also

---

<sup>3</sup> In this study, the requirements imposed on the spatial task were so high that unfortunately, participants apparently performed near chance level. In this context, one can argue that individuals had no alternative but to rely on temporal information (albeit irrelevant). In sharp contrast, in our study, participants were able to accurately judge relevant magnitude in both the spatial and temporal bisection tasks.

see Wang & Cai, 2017). Recent studies in the field have also put forward the role of working memory in space-time interference (Cai & Connell, 2016; Starr & Brannon, 2016; also see Cai et al., 2014). For instance, Starr & Brannon (2016) demonstrated that space did influence temporal estimates but only when some resources in visuospatial working memory were available. Overall, it suggests that the automatic processing of spatial information shapes the spatiotemporal interferences (space-on-time and time-on-space) that might arise in working memory.

Finally, the spatiotemporal interference observed in this study could also be supported by a spatial representation account or a generalized magnitude account according to which time-space interference emerges from a shared representation format for these two dimensions or could be magnitude-based, as suggested by AToM (Buetti & Walsh, 2009; Walsh, 2003). This interpretation could be consistent with the study of Cohen-Kadosh, Lammertyn, & Izard (2008) in which they pointed out that when the relevant and irrelevant dimensions are difficult to discriminate (low discriminability/high cognitive load), the magnitude interference might occur during the comparison stage. As the specific brain regions dedicated to processing relevant magnitude are exceeded, other areas common to various magnitudes might be involved to compensate.

Given that space-time interactions are highly flexible, being either uni- or bi-directional, either symmetrical or asymmetrical, as a function of sensory modality acuity and of the gradient of automaticity (see Loeffler et al., 2018), spatiotemporal interactions might emerge at different processing stages (see Hayashi et al., 2013 for time-numerosity interaction). However, on the basis of the present study, we can affirm that the time-on-space effect is undoubtedly robust. However, it can only be observed if the two above-cited criteria are met: (1) to impede the automatic processing of space (as indexed in part by RTs) and (2) to enforce the requirement of sensory accumulation by using sequential spatial information. Further research using behavioral and neuroimaging methods is needed to determine at what stage(s) space-time interactions occur and what the cerebral regions involved in time-on-space interference are.

## References

- Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring: Understanding time through spatial metaphors. *Cognition*, 75, 1–28.
- Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1831–1840.
- Bottini, R., & Casasanto, D. (2013). Space and time in the child's mind: metaphoric or ATOMIC?. *Frontiers in psychology*, 4, 803.
- Brus, J., Heng, J. A., & Polanía, R. (2019). Weber's Law: A Mechanistic Foundation after Two Centuries. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(11), 906-908.
- Cai, Z. G., & Connell, L. (2015). Space-time interdependence: Evidence against asymmetric mapping between time and space. *Cognition*, 136, 268-281.
- Cai, Z. G., & Connell, L. (2016). On magnitudes in memory: An internal clock account of space-time interaction. *Acta psychologica*, 168, 1-11.
- Cai, Z. G., Connell, L., & Holler, J. (2013). Time does not flow without language: Spatial distance affects temporal duration regardless of movement or direction. *Psychonomic bulletin & review*, 20(5), 973-980.
- Cai, Z. G., & Wang, R. (2014). Numerical magnitude affects temporal memories but not time encoding. *PLoS One*, 9(1), e83159.
- Cai, Z. G., Wang, R., Shen, M., & Speekenbrink, M. (2018). Cross-dimensional magnitude interactions arise from memory interference. *Cognitive Psychology*, 106, 21-42.
- Casasanto, D., & Boroditsky, L. (2008). Time in the mind: Using space to think about time. *Cognition*, 106, 579–593.
- Casasanto, D., Fotakopoulou, O., & Boroditsky, L. (2010). Space and time in the child's mind: Evidence for a cross-dimensional asymmetry. *Cognitive Science*, 34, 387–405.
- Clark, H. H. (1973). Space, time, semantics, and the child. In T. E. Moore (Ed.), *Cognitive development and the acquisition of language* (pp. 27–63). New York: Academic Press.
- Cohen J., Hansel C. E. M., Sylvester J. D. (1953). A new phenomenon in time judgment. *Nature*, 172, 901.
- Cohen-Kadosh, R. C., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in neurobiology*, 84(2), 132-147.

- Collyer, C. E. (1977). Discrimination of spatial and temporal intervals defined by three light flashes: Effects of spacing on temporal judgments and of timing on spatial judgments. *Perception & Psychophysics*, 21, 357-364. doi:10.1016/j.humov.2007.07.009
- Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., & Vidal, F. (2015). SMA selectively codes the active accumulation of temporal, not spatial, magnitude. *Journal of cognitive neuroscience*, 27(11), 2281-2298.
- Coull, J., & Droit-Volet, S. (2018). Explicit understanding of duration develops implicitly through action. *Trends in Cognitive Sciences*, 22 (10) (2018), pp. 923-937, 10.1016/j.tics.2018.07.011
- De Corte, B. J., Navarro, V. M., & Wasserman, E. A. (2017). Non-cortical magnitude coding of space and time by pigeons. *Current Biology*, 27(23), R1264-R1265.
- DeWind, N. K., Adams, G. K., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2015). Modeling the approximate number system to quantify the contribution of visual stimulus features. *Cognition*, 142, 247-265.
- Dormal, V., & Pesenti, M. (2013). Processing numerosity, length and duration in a three-dimensional Stroop-like task: towards a gradient of processing automaticity?. *Psychological research*, 77(2), 116-127.
- Droit-Volet, S. (2010). Speeding up a master clock common to time, number and length?. *Behavioural processes*, 85(2), 126-134.
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Fayol, M. (2008). Time, number and length: Similarities and differences in discrimination in adults and children. *Quarterly journal of experimental psychology*, 61(12), 1827-1846.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39, 175-191.
- Goldreich D (2007) A Bayesian Perceptual Model Replicates the Cutaneous Rabbit and Other Tactile Spatiotemporal Illusions. PLoS ONE 2(3): e333. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000333>
- Hayashi, M. J., Kanai, R., Tanabe, H. C., Yoshida, Y., Carlson, S., Walsh, V., & Sadato, N. (2013). Interaction of numerosity and time in prefrontal and parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33(3), 883-893.

- Helson, H., & King, S. M. (1931). The time-on-space effect: an example of psychological relativity. *Journal of Experimental Psychology*, 14(3), 202.
- Henry, M. J., & McAuley, J. D. (2009). Evaluation of an imputed pitch velocity model of the auditory kappa effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(2), 551.
- Henry, M. J., McAuley, J. D., & Zaleha, M. (2009). Evaluation of an imputed pitch velocity model of the auditory tau effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(6), 1399-1413.
- de Hevia, M.D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E.S., Streri A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, pp. 4809-4813
- Homma, C. T., & Ashida, H. (2015). What makes space-time interactions in human vision asymmetrical? *Frontiers in Psychology*, 6: 756. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00756
- Homma, C. T., & Ashida, H. (2019). Temporal Cognition Can Affect Spatial Cognition More Than Vice Versa: The Effect of Task-Related Stimulus Saliency. *Multisensory research*, 1(aop), 1-20.
- Jones, B., & Huang, Y. L. (1982). Space–time dependencies in psychophysical judgment of extent and duration: Algebraic models of the tau and kappa effects. *Psychological Bulletin*, 91, 128-142.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the Flesh* (Vol. 4). New York: Basic books.
- Lambrechts, A., Walsh, V., & van Wassenhove, V. (2013). Evidence accumulation in the magnitude system. *PloS one*, 8(12), e82122.
- Link, S. W. (1992). Scientific psychology series. The wave theory of difference and similarity. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Loeffler, J., Cañal-Bruland, R., Schroeger, A., Tolentino-Castro, J. W., & Raab, M. (2018). Interrelations between temporal and spatial cognition: The role of modality-specific processing. *Frontiers in psychology*, 9, 2609.
- Magnani, B., Oliveri, M., & Frassinetti, F. (2014). Exploring the reciprocal modulation of time and space in dancers and non-dancers. *Experimental brain research*, 232(10), 3191-3199.
- Martin, B., Wiener, M., & van Wassenhove, V. (2017). A Bayesian perspective on accumulation in the magnitude system. *Scientific reports*, 7(1), 630.

- Merritt, D. J., Casasanto, D., & Brannon, E. M. (2010). Do monkeys think in metaphors? Representations of space and time in monkeys and humans. *Cognition*, 117(2), 191–202.
- Pardo-Vazquez, J. L., Castiñeiras-de Saa, J. R., Valente, M., Damião, I., Costa, T., Vicente, M. I., ... & Renart, A. (2019). The mechanistic foundation of Weber's law. *Nature neuroscience*, 1-10.
- R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Reali, F., Lleras, M., & Alviar, C. (2019). Asymmetrical time and space interference in Tau and Kappa effects. *Cogent Psychology*, 6(1), 1568069.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-prime user's guide*. Pittsburg: Psychology Software Tools Inc.
- Simen, P., Vlasov, K., & Papadakis, S. (2016). Scale (in) variance in a unified diffusion model of decision-making and timing. *Psychological review*, 123(2), 151.
- Starr, A., & Brannon, E. M. (2016). Visuospatial working memory influences the interaction between space and time. *Psychonomic Bulletin & Review*. 23, 6, 1839-1845.
- Tsouli, A., Dumoulin, S. O., te Pas, S. F., & van der Smagt, M. J. (2018). Adaptation reveals unbalanced interaction between numerosity and time. *Cortex*.
- Vicario, C. M., Pecoraro, P., Turriziani, P., Koch, G., Caltagirone, C., & Oliveri, M. (2008). Relativistic compression and expansion of experiential time in the left and right space. *PloS one*, 3(3), e1716.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483–488.
- Wang, R., & Cai, Z. G. (2017). Cross-dimensional magnitude interaction is modulated by representational noise: Evidence from space-time interaction.
- Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of vision*, 7(10), 2-2.
- Xue, J., Yang, J., and Zhao, Q. (2014). Chinese-English bilinguals processing temporal-spatial metaphor. *Cognitive Processing*, 15, 269–281. doi: 10.1007/s10339-014-0621-5
- Zito, G. A., Cazzoli, D., Scheffler, L., Jäger, M., Müri, R. M., Mosimann, U. P., et al. (2015). Street-crossing behavior in younger and older pedestrians: an eye- and head-tracking study. *BMC Geriatrics*, 15:176. doi: 10.1186/s12877-015-0175-0
- Żychaluk, K., & Foster, D. H. (2009). Model-free estimation of the psychometric function. *Atten Percept Psychophys* 71: 1414–1425.

## Conclusion et discussion

L'objectif de ce chapitre expérimental était de produire un premier élément de preuve sur l'importance d'équilibrer la demande en ressources cognitives entre les tâches d'estimation temporelle et spatiale, pour étudier les effets d'interférence espace-temps. Dans la première expérience, nous avons pu répliquer la supériorité de Kappa sur Tau, comme habituellement décrit dans la littérature (Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsy, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al., 2010). Les ratios de Weber dans ces tâches étaient équilibrés, mais nous avons fait l'hypothèse que la tâche spatiale demandait moins de ressources cognitives, compte tenu de la différence de temps de réaction avec la tâche temporelle. Conformément à nos attentes, l'effet Kappa était plus important que l'effet Tau. Dans la seconde expérience, nous avons réduit la discriminabilité des distances à estimer (de 3,2° à 4,8°) en comparaison de celles de l'expérience 1 (où les distances étaient comprises entre 1,6° et 12,8°). Cette fois-ci, si l'on se fie au temps de réaction moyen, les tâches spatiales et temporelles demandaient autant de ressources cognitives l'une que l'autre. L'effet Tau était significativement plus important que l'effet Kappa. Ce résultat valide ainsi nos premières hypothèses et nous permet d'avoir un premier argument solide en faveur de la variabilité de l'effet Tau en fonction de la demande en ressources cognitives de la tâche spatiale. La troisième expérience avait pour but de tester la flexibilité de l'effet de Tau en tentant de répliquer nos résultats en intra-sujets. Les participants devaient effectuer une expérience divisée en deux blocs, regroupant les tâches spatiales des expériences 1 et 2. Nous avons constaté un important effet de l'ordre du bloc. Les participants ayant effectué l'expérience dans l'ordre invoquant une demande croissante en ressources cognitives n'ont pas démontré de différence significative entre les deux tâches en termes de temps de réaction, ni en termes d'effet Tau. Cependant, les participants ayant effectué l'expérience dans l'ordre invoquant une demande décroissante en

ressources cognitives ont présenté une différence significative entre les deux tâches pour les temps de réaction, et pour l'effet Tau. Ces résultats suggèrent que l'ordre "Demande croissante" a permis aux participants de bénéficier d'un effet d'entraînement entre la première tâche (très simple) pour effectuer la deuxième tâche sans avoir à engager de ressources cognitives. Par ricochet, cet entraînement a supposément empêché l'émergence de l'effet Tau. Tandis que l'ordre "Demande décroissante" a dû provoquer l'engagement d'une quantité conséquente de ressources cognitives pour commencer par la tâche difficile en premier lieu. Cette mobilisation des ressources a en contrepartie permis de faire émerger l'effet Tau, et d'obtenir un effet Tau plus important durant la tâche Demandante que dans la tâche Non demandante.

Les trois expériences de cette étude ont permis de démontrer que deux critères étaient importants pour induire un important effet Tau. En utilisant des distances séquentielles, forçant les participants à accumuler l'information, et en réduisant la discriminabilité des distances, les participants ont dû mobiliser plus de ressources cognitives sur la tâche et ont alors témoigné d'un effet Tau important. Nous pensons que la relativement faible discriminabilité des distances ainsi que la séquentialité des marqueurs a permis de briser l'automatisme de l'estimation spatiale. Cette hypothèse s'appuie sur une proposition élaborée par Dormal et Pesenti (2013). En effet, ils ont suggéré qu'en modalité visuelle, le temps n'était pas traité de manière automatique, contrairement à l'espace. Par ailleurs, à notre connaissance notre étude est la première à utiliser un paradigme visuel qui met en évidence un effet Tau plus important que l'effet Kappa. Les études dans la littérature sont généralement en accord pour dire que le temps ne peut pas interférer autant l'espace que ce que l'espace influence le temps en modalité visuelle (Cai, Connell & Holler, 2013 ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Dormal & Pesenti, 2013 ; Xuan et al., 2007 ; Coull et al., 2015, Casasanto et al., 2010, Merritt et al., 2010, Bottini & Casasanto, 2013). En effet, la vision est à priori la modalité sensorielle optimale pour traiter

les informations spatiales, tandis que les informations temporelles seraient traitées avec une excellente précision en modalité auditive (Loeffler et al., 2018).

Notre étude remet donc en doute l'utilisation de la théorie de la métaphore conceptuelle pour modéliser le SCTM (Lakoff & Johnson, 1980 ; 1999 ; Boroditsky, 2000, Casasanto & Boroditsky, 2008). En revanche, nos résultats semblent interprétables selon la théorie AToM (Bueti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003), bien que ceux-ci ne permettent pas pour autant de valider cette théorie. En effet, nous avons pu montrer qu'en manipulant la demande en ressources cognitives il était possible de produire un effet Tau plus important que l'effet Kappa. Néanmoins, la théorie AToM suggère que les magnitudes s'interfèrent l'une et l'autre de manière réciproque et symétrique. Par conséquent, l'effet Tau devrait être de force équivalente à la force de l'effet Kappa. Or, nous avons pu montrer que la différence de force entre ces effets pouvait varier, sans nécessairement obtenir une équivalence des forces des effets d'interférence.

Quelques chercheurs pensent que l'effet Tau dans d'une tâche d'estimation de distance où l'information est délivrée de manière séquentielle serait attribuable à un effet de vitesse induite (Imputed Velocity) et non pas à de la durée (Henry & McAuley, 2009, Henry, MacAuley & Zaleha, 2009 ; Reali, Lleras & Alviar, 2019). La présentation successive des deux stimuli à des localisations différentes produirait la perception illusoire d'un déplacement du stimulus, responsable de l'effet Tau. Selon ces positionnements théoriques, quand un stimulus se déplace sur une distance donnée, la vitesse induite augmente de manière inversement proportionnelle à la durée. Les participants auront tendance à surestimer la distance parcourue, ce d'autant plus si le temps est court. Aussi, par extension, plus la distance parcourue est longue pour un laps de temps donné, plus l'effet Tau doit augmenter. Car ce rapport distance/durée augmente la vitesse induite. Cependant, nos résultats ne satisfont pas ces prédictions, puisque nous observons que l'effet Tau gagne en force en condition Demandante en ressources

cognitives en comparaison de l'effet Tau en condition Non demandante en ressources cognitives. Or, les distances utilisées dans la tâche Demandante de l'expérience 3 étaient plus faibles (4° en moyenne) que dans la tâche Non demandante de l'expérience 3 (7,2° en moyenne). Cet exemple se vérifie aussi en comparaison inter-sujets entre l'expérience 2 et l'expérience 1. La vitesse induite par les stimuli devrait être plus faible en condition Demandante qu'en Non demandante. Selon la théorie de la vitesse induite, les participants en condition Demandante auraient dû présenter un effet Tau amoindrie, or nous avons observé strictement l'inverse. D'autres études suggèrent que les effets d'interférence espace-temps interviendraient durant le processus de mémorisation des caractéristiques du stimulus (Cai & Wang, 2021 ; Cai et al., 2018). Cependant, ces études utilisaient des tâches de reproduction de durée ou de distance. A la fin de chaque essai, les participants étaient informés de la caractéristique du stimulus (sa longueur, ou sa durée) qu'ils devaient reproduire. Les participants devaient donc mémoriser les deux magnitudes en même temps à chaque essai, pour n'en reproduire qu'une seule des deux. Bien que notre étude ne remette pas en cause la possibilité que les effets d'interférence espace-temps interviennent durant la phase de mémorisation dans ces études-là, il semble peu probable que ce soit le cas dans nos expériences. Nous ne pouvons pas interpréter nos résultats dans le cadre de cette théorie car notre paradigme n'exigeait pas des participants qu'ils encodent explicitement les deux magnitudes à la fois. Ils devaient estimer la magnitude pertinente et ignorer la magnitude non pertinente, plutôt que d'encoder activement les deux pendant l'essai. Pour le moment, sans réfuter qu'il soit possible que des effets d'interférence espace-temps puissent émerger pendant le processus de mémorisation (Cai & Wang, 2021 ; Cai et al., 2018 ; Homma & Ashida, 2019), nous pensons que les effets d'interférence espace-temps que nous avons obtenus auraient plutôt un lien avec le processus d'accumulation de l'information (qui lui-même, est lié à la mémoire de travail). C'est par ailleurs ce que pourraient suggérer d'autres études ayant montré l'existence d'un lien

entre l'émergence des effets d'interférence et la mémoire de travail (Cai & Connell, 2016 ; Cai & Connell., 2015 ; Starr & Brannon, 2016).

Notre étude montre que les conditions optimales pour favoriser l'apparition d'un effet Tau de force comparable à celle de l'effet Kappa sont : premièrement d'utiliser des stimuli séquentiels afin que les participants soient obligés d'accumuler l'information lors des estimations spatiales (au même titre que lors des estimations temporelles, qui elles, requièrent de la mémoire de travail ; Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015 ; Coull & Droit-Volet, 2018), deuxièmement de briser l'automatisme de l'estimation spatiale (DeWind, Adams, Platt & Brannon, 2015 ; Ernst & Banks, 2002 ; Homma & Ashida, 2015), en réduisant la discriminabilité des distances (en comparaison avec les principales études de la littérature ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto et al., 2010), et troisièmement de s'assurer de l'équivalence en demande de ressources cognitives que nécessitent les tâches d'estimation.

# Chapitre 5 : Différences inter-individuelles et effets d'interférence

## Introduction

Pour produire des effets d'interférence, les participants doivent effectuer des tâches d'estimation spatiale et temporelle dans laquelle les caractéristiques spatiales et temporelles du stimulus varient de manière orthogonale pour permettre une indépendance entre les jugements de distance ou de durée. Dans le 4<sup>ème</sup> chapitre, nous avons pu constater que l'effet Tau était équivalent (voire supérieur) à l'effet Kappa si et seulement si le paradigme expérimental respectait un certain nombre de critères. Dans un grand nombre de recherches sur cette problématique, les tâches sont équilibrées de sorte que les participants aient des ratios de Weber (ou un index de la précision comme le pourcentage de bonnes réponses) équivalents dans les deux tâches (Casasanto & Boroditsy, 2008 ; Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015 ; Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017). Cependant, de récentes études ont remis en question le postulat selon lequel ce seul critère était suffisant pour correctement équilibrer la difficulté des tâches (Brus, Heng & Polania, 2019 ; Link, 1992 ; Pardo-Vasquez et al., 2019 ; Simen, Vlasov & Papadakis, 2016).

La demande en ressources cognitives des tâches semble être un critère déterminant dans l'émergence des effets d'interférence. Pour obtenir des interférences réciproques, il faut veiller à ce que les tâches soient équilibrées en termes de coût cognitif. Pour contrôler ce critère, nous avons utilisé, dans le chapitre précédent, des stimuli dont la dimension spatiale était difficile à discriminer. En effet, la différence entre les distances courtes et les distances longues était fortement réduite en comparaison avec les distances utilisées lors des paradigmes habituels

portant sur les effets d'interférence espace-temps. Ainsi, nous espérons perturber/empêcher l'automatisme du traitement des caractéristiques spatiales en modalité visuelle lorsque la discriminabilité des distances était évidente (DeWind, Adams, Platt & Brannon, 2015 ; Dormal & Pesenti, 2013 ; Ernst & Banks, 2002 ; Homma & Ashida, 2015). De plus, pour mobiliser des ressources en mémoire de travail, les stimuli de nos expériences étaient présentés de manière séquentielle, forçant les participants à maintenir et à accumuler des informations en mémoire. La séquentialité des stimuli est considérée comme étant un critère essentiel dans l'émergence des effets d'interférence du temps sur les autres magnitudes (Coull et al., 2015 ; pour une revue, Coull & Droit-Volet, 2018).

Cependant, certains regards critiques pourraient attribuer l'émergence de l'effet Tau dans nos expériences à de possibles biais méthodologiques. Par exemple, diverses théories tentent d'expliquer en quoi l'utilisation de stimuli séquentiels provoque l'émergence de l'effet Tau. L'une d'elles suppose que lorsque l'on perçoit de l'espace au cours du temps, nous estimerions non pas la dimension spatiale mais la vitesse induite du stimulus (Henry & McAuley, 2009 ; Henry, McAuley & Zaleha, 2009 ; Reali, Lleras & Alviar, 2019). Cette interprétation théorique ne coïncide cependant pas avec nos résultats puisque selon cette théorie de la vitesse induite, l'effet Tau aurait dû être moindre quand les participants étaient en condition Demandante en ressources cognitives. En effet, les distances utilisées dans nos tâches spatiales Demandantes étaient plus petites qu'en condition Non demandante. De ce fait, la vitesse induite aurait été inférieure en condition Demandante, conduisant à une réduction de l'effet Tau. Or, nos études donnent lieu à des résultats tout à fait inverses. Du moins, c'est ce que nous avons observé dans les expériences 1, 2 et 3 du 4<sup>ème</sup> chapitre. Une autre théorie suggère que les effets d'interférence espace-temps avec des stimuli séquentiels seraient en réalité dus à un effet de mémoire (Cai & Wang, 2021 ; Cai et al., 2018). Or, cette théorie se base sur des expériences dans lesquelles les participants n'étaient informés de la magnitude à

estimer qu'une fois l'essai terminé. Les participants devaient donc faire attention et mémoriser à la fois la dimension temporelle et la dimension spatiale du stimulus, puisque les deux magnitudes étaient pertinentes. Selon ces études, les effets d'interférence obtenus sont des effets de mémoire. Cependant, il semble peu crédible d'interpréter les résultats des expériences 1, 2 et 3 selon cette théorie puisque les participants devaient ignorer la magnitude non pertinente, contrairement à la tâche utilisée dans Cai et al (2018).

Néanmoins, nous plaidons en faveur d'une relation étroite entre les effets d'interférence espace-temps et les processus de mémoire de travail (Cai & Wang, 2021 ; Cai & Connell, 2016 ; Starr & Brannon, 2016). Cette théorie a déjà été proposée par Starr et Brannon (2016), qui ont démontré que les ressources cognitives disponibles dans la mémoire de travail visuo-spatiale étaient nécessaires pour que l'effet Kappa émerge. Dans leur étude, les participants ont effectué une tâche de reproduction de distances et de durées, similaire à celle utilisée par Casasanto et Boroditsky en 2008 (voir Figure 14). Cependant, leur protocole expérimental était divisé en trois blocs, chacun avec une condition expérimentale particulière. L'un des trois blocs était une tâche reproduisant simplement le paradigme de Casasanto et Boroditsky (2008). Les deux autres blocs comportaient une double tâche. L'une des doubles tâches ajoutait une tâche verbale au protocole de base. Les participants devaient mémoriser une suite de 7 chiffres, effectuer 5 essais de reproduction de magnitude, puis ils devaient indiquer parmi deux suites de deux chiffres, laquelle était inclus dans la suite de 7 chiffres précédemment présentée. L'autre double tâche ajoutait une tâche visuo-spatiale au protocole de base. Les participants devaient mémoriser la position de 4 cases noires dans un tableau de 4x4 cases, effectuer 5 essais de reproduction de magnitude, puis ils devaient indiquer parmi deux tableaux de 4x4 cases, lequel correspondait au tableau précédemment présenté. Dans la condition "tâche de base seule", les auteurs ont reproduit les résultats de Casasanto et Boroditsky (2008), ayant un effet Kappa significatif, mais pas d'effet Tau. Dans la condition de double tâche, il y avait une

importante demande en ressources cognitives liées à la mémoire de travail visuo-spatiale, ou verbale. Leurs résultats montrent que l'effet Kappa émergeait en condition "double tâche verbale", mais pas en condition "double tâche visuo-spatiale". L'étude de Starr et Brannon (2016) suggère donc que la demande en ressources cognitives liée à la mémoire de travail visuo-spatiale entraverait l'automatisme du traitement des informations spatiales. Par conséquent, les effets d'interférence espace-temps émergeraient durant les processus liés à la mémoire de travail.

L'objectif de ce chapitre est de continuer la série expérimentale du 4<sup>ème</sup> chapitre pour conforter nos résultats en testant les potentiels biais méthodologiques de notre protocole. Nos expériences présentent de potentielles failles que nous allons expliciter ci-dessous. Premièrement, la modalité de réponse est dichotomique, les participants doivent se positionner en faveur de la réponse "courte" ou "longue". Cela ne nous informe donc pas de manière précise sur l'estimation du participant. Dans les faits, notre paradigme ne nous permet de mesurer les sous-estimations et surestimations que quand le participant se trompe, alors qu'un participant pourrait très bien surestimer ou sous-estimer une magnitude sans pour autant se tromper dans sa réponse. Par exemple, si le participant voit une distance "longue", présentée pendant une durée "courte", même s'il répond "longue", il n'est pas impossible qu'il l'ait trouvée moins longue que si la durée avait été elle aussi "longue", mais notre paradigme ne nous permet pas de le déterminer (manque de sensibilité de la réponse). De plus, la magnitude pertinente n'est composée que de 2 modalités (les modalités extrêmes). Cela pourrait conduire à un biais d'habituation qui, à long terme, pourrait les aider à faire une totale abstraction de la magnitude non pertinente. C'est par ailleurs ce qui pourrait potentiellement être à l'origine de l'effet de l'ordre des blocs dans l'expérience 3.

De plus, bien que nous ayons établi un lien entre l'effet Tau et la demande en ressources cognitives des tâches, nous ne pouvons vraiment affirmer qu'il en est de même pour l'effet

Kappa, au regard de nos propres expérimentations. Selon la théorie AToM (Buetti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003), nous pourrions penser que nos performances pour estimer une magnitude sont semblables d'une magnitude à l'autre. Plus nous sommes performants pour estimer une magnitude, plus nous serions censés l'être aussi pour estimer les autres magnitudes. Il serait donc intéressant de tester sur un nombre assez conséquent de participants si ceux qui sont précis pour estimer l'espace sont aussi ceux qui sont précis pour estimer le temps. La même question pourrait se poser vis-à-vis des temps de réaction (TRs), les participants dont les ressources cognitives sont fortement engagées pour une tâche devraient aussi avoir des TRs élevés dans l'autre tâche. Enfin, nous pourrions étudier s'il existe un lien entre nos performances et la force des effets Tau et Kappa, et voir si cet hypothétique lien est commun aux deux effets d'interférence.

Pour répondre à toutes ces questions, nous avons mis en place deux expériences. L'expérience 4 sera une réplique de notre paradigme de base (expérience 2), mais avec 2 modifications majeures. Premièrement, la magnitude non-pertinente a été manipulée en 5 modalités au lieu de seulement 2, ce qui évite la catégorisation court/long du stimulus à estimer (Proctor & Cho, 2006). Et deuxièmement, nous avons opté pour une réponse quantitative continue. Les participants ne devaient plus répondre en indiquant "courte" ou "longue", mais ils devaient cliquer sur une barre grise verticale. A la fin de chaque essai, une barre verticale grise apparaissait à l'écran. A l'aide de la souris, les participants devaient déplacer le curseur pour cliquer à l'endroit souhaité le long de cette barre. L'estimation était représentée par la position du clic sur l'axe vertical. Ainsi, plus ils estimaient la magnitude comme étant courte ou longue, plus ils devaient cliquer vers une des extrémités de la barre. Cela permettait aux participants d'estimer les magnitudes de manière plus précise, et également de nous fournir une réponse plus précise pour analyser les données. Nous espérons ainsi gagner en sensibilité pour analyser les variations des estimations, dues à la magnitude non pertinente.

Pour approfondir les connaissances sur la perception des durées et des distances, ainsi que sur les effets d'interférence, nous avons également mené une étude avec un échantillon de 69 participants. L'objectif était centré sur les différences inter-individuelles. En effet, la théorie ATOM prédit des corrélations positives entre perception des durées et perception des distances. Aussi, des corrélations positives sont également attendues entre l'effet Kappa et l'effet Tau selon ce modèle théorique. L'expérience 5 est donc une reproduction de l'expérience 2, avec 5 modalités non pertinentes, effectuée par 69 participants. Cette expérience avait pour objectif de nous éclairer sur les liens entre les performances inter-individuelles des participants (précision et ressources cognitives nécessaires pour réaliser les tâches) et les effets d'interférence espace-temps.

## **5.1 Expérience 4 – Adaptation méthodologique du protocole expérimental**

### Introduction

De nos jours, les données expérimentales sont rarement en faveur d'une symétrie entre les effets Tau et Kappa, l'effet Kappa étant presque toujours plus imposant que l'effet Tau. Cependant, en respectant certains critères, nous avons pu mettre en place un paradigme inversant cette asymétrie. Ce constat questionne quant au sens que l'on doit attribuer aux effets d'interférence dans le débat qui oppose la théorie AToM avec des théories de hiérarchisation comme celle de la CMT. Le paradigme que nous avons utilisé avait comme particularité que les distances étaient présentées séquentiellement, étaient de longueurs suffisamment semblables pour que leur discrimination ne soit pas automatique, et que la tâche spatiale nécessitait un coût cognitif au moins équivalent à celui de la tâche temporelle. Néanmoins, contrairement à de nombreux paradigmes traitant du même sujet, nous n'utilisons que deux modalités pour la magnitude non pertinente, et les réponses des participants étaient

dichotomiques, là où d'autres tâches telles que des tâches de reproduction de magnitude permettent d'avoir des données quantitatives continues des estimations des participants. Dans le but d'écartier tout biais méthodologique potentiel, nous avons mis en place une expérience répondant à ces critères, en adaptant le paradigme de base. Les hypothèses sont similaires aux hypothèses de l'expérience 2 : un effet Tau plus important que l'effet Kappa, et une demande en ressources cognitives équivalente dans les deux tâches.

## Méthode

### Participants

Un total de 27 participants (dont 23 femmes ; tous droitiers) âgés de 17 à 24 ans (moyenne 20,86 ans, écart type 1,65) ont participé à cette étude. Tous les participants ont été recrutés à l'Université Facultad de Psicología de la UGR à Grenade (Espagne) et ont donné leur consentement écrit. L'étude a été réalisée selon les principes de la Déclaration d'Helsinki et en accord avec le Comité d'Éthique du Département de Psychologie (Université Paul Valéry Montpellier). Tous ont rapporté avoir une vision normale ou corrigée.

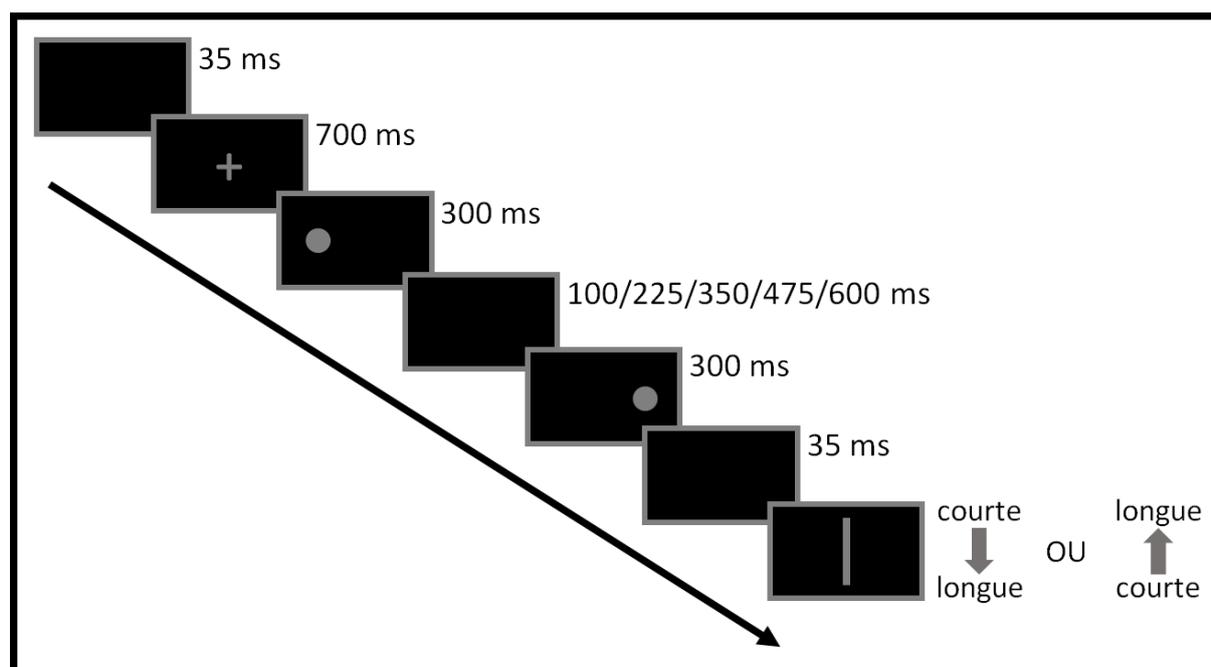
### Appareillage

Un ordinateur disposant du logiciel E-Prime 2.0 software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) pour contrôler la présentation des stimuli, les différentes séquences chronométrées, et récolter les données. Les stimuli étaient présentés sur un écran de 24.4 pouces (1920 x 1080 pixels, 60 Hertz). Les réponses étaient collectées en déplaçant et en cliquant sur le bouton gauche d'une souris avec la main droite.

## Stimuli et procédure

Les participants étaient testés individuellement dans une pièce sans lumière et silencieuse, porte fermée. Les participants étaient assis sur une chaise, à 57cm de l'écran d'ordinateur sur lequel ils allaient passer l'expérience. Avant de commencer, il était demandé aux participants leur âge, leur sexe, et leur main dominante (seul(e)s les droitier(è)s pouvaient participer).

Le matériel utilisé ainsi que la procédure employée étaient assez similaires au matériel et à la procédure de l'expérience 2, mais avec 5 magnitudes non-pertinentes au lieu de seulement 2, et avec une manière de répondre différente. Les participants ont effectué une tâche de bissection temporelle et une tâche de bissection spatiale. Chaque bloc était une suite d'essais durant lesquels les participants devaient estimer si la durée ou la distance (selon la tâche) du stimulus présenté était courte ou longue. Chaque essai présentait premièrement un fond noir vide affiché pendant 35 ms, suivi d'une croix de fixation grise de 0,5cm sur fond noir s'affichant pendant 700 ms. Puis, un premier point gris de  $0,8^\circ$  d'angle visuel s'affichait sur un fond noir pendant 300 ms, suivi d'un fond noir vide dont la durée variait (100 / 225 / 350 / 475 / ou 600 ms), puis un second point gris de  $0,8^\circ$  d'angle visuel s'affichait sur un fond noir pendant 300 ms, à une distance qui variait horizontalement par rapport au premier point (3,2 / 3,6 / 4 / 4,4 / ou  $4,8^\circ$ ). Ce deuxième point était suivi par un fond noir vide pendant 35 ms, puis par l'affichage de l'écran de réponse. Le participant voyait une barre grise verticale sur fond noir, de  $0,5^\circ$  de largeur, et  $17,9^\circ$  de hauteur. Selon les instructions fournies en début d'expérience, il devait soit cliquer vers le haut de la barre soit cliquer vers le bas de la barre pour indiquer à quel point il estimait la magnitude du stimulus comme étant "courte" ou "longue" (voir Figure 28). Le participant devait cliquer avec le curseur de la souris, en utilisant le clic gauche de la souris (située dans sa main droite).



**Figure 28.** Représentation schématique d'un essai de l'expérience 4.

Les points gris étaient toujours positionnés au centre de l'axe vertical de l'écran, mais leur position sur l'axe horizontal variait. Ainsi, les points pouvaient effectuer un pseudo-mouvement (de gauche à droite, ou de droite à gauche). Le premier point apparaissait donc soit plutôt à gauche de l'écran (lors d'un mouvement gauche-droite), soit plutôt à droite (lors d'un mouvement droite-gauche). Il y avait deux positions possibles pour chaque côté de départ. Ainsi, le premier point gris pouvait se trouver soit à  $1,06^\circ$ , soit à  $2,13^\circ$  d'écart du centre de l'écran (donc à  $-2,13^\circ / -1,06^\circ / +1,06^\circ /$  ou  $+2,13^\circ$  par rapport au centre).

En fonction de la tâche les participants devaient estimer soit si la durée qui s'est écoulée entre les deux points était plutôt courte ou plutôt longue (tâche temporelle), soit si la distance qui les séparait était plutôt courte ou plutôt longue (tâche spatiale). Pour répondre, la moitié des participants devaient cliquer vers le haut de la barre grise pour indiquer qu'ils estiment la magnitude comme étant plutôt "courte", alors que l'autre moitié devait cliquer vers le bas de la barre. Plus ils estimaient qu'une magnitude était courte ou longue, plus ils devaient cliquer vers l'extrémité correspondante de la barre (par exemple cliquer tout en haut de la barre grise si cela

correspond à "court" et que le participant estime que la magnitude était extrêmement courte). Les coordonnées des réponses en pixel étaient enregistrées, la coordonnée Y de l'axe vertical étant donc notre variable dépendante.

L'ordre des blocs expérimentaux, l'ordre des essais, ainsi que la position de réponse étaient contrebalancés au travers des sujets. Chaque essai étant effectué 2 fois, chaque bloc expérimental contenait  $5 \times 5 \times 2 \times 2 \times 2 = 200$  essais (5 durées (100/225/350/475/600 ms), 5 distances (3,2/3,6/4/4,4/4,8°), 2 directions (gauche-droite ou droite-gauche), 2 positions de départs différentes par direction (1,07° d'écart entre les deux positions de départ) et 2 répétitions).

L'expérience commençait par une phase d'instruction, puis par la présentation d'exemples afin que les participants se familiarisent avec ce qui est considéré comme "court" ou comme "long". Une phase d'exemples démarrait ensuite, composée premièrement d'un exemple d'essai ayant une durée courte (100 ms) et d'un autre ayant une durée longue (600 ms), sans variation de la distance (4°), chacun répétés deux fois (une fois de gauche à droite, puis de droite à gauche l'autre fois), suivie d'un exemple de distance courte (3,2°) et de distance longue (4,8°), sans variation de la durée (350 ms), répétés deux fois aussi (une fois de gauche à droite, puis de droite à gauche l'autre fois).

Le participant pouvait ensuite passer aux blocs expérimentaux, dont l'ordre était contrebalancé au travers des participants. Avant chaque tâche, le participant devait effectuer un entraînement dont les consignes correspondaient aux consignes de la tâche en question (entraînement sur les distances pour le bloc spatial, et entraînement sur les durées pour le bloc temporel). Lors de l'entraînement temporel, les durées affichées étaient celles précédemment présentées durant la phase d'exemples, avec 5 répétitions pour chaque essai (donc 20 essais). Lorsqu'une durée était présentée, le participant devait cliquer sur une barre grise verticale.

Selon les instructions, il devait cliquer soit en haut soit en bas de la barre pour estimer la durée comme étant "courte" ou "longue". Après chaque réponse du participant, un feedback était donné (correct ! / non, la durée était plus courte/longue). Pour cette phase d'entraînement, si un participant cliquait trop près du centre de la barre (moins de 54 pixels d'écart avec le centre de la barre), sa réponse était considérée comme fautive. Une fois ce premier entraînement terminé, les participants effectuaient la tâche temporelle. L'entraînement spatial est similaire à l'entraînement temporel, excepté que les participants devaient juger les distances, et que les essais affichés correspondaient aux essais présentés en phase d'exemples pour montrer les différentes distances. Là aussi chaque essai était présenté 5 fois (donc 20 essais d'entraînement).

L'expérience étant assez longue, une fenêtre s'affichait afin de proposer une courte pause au participant tous les 50 essais. Notez que la distance et la durée variaient de manière orthogonale dans chacune des tâches. Dans la tâche spatiale, la distance était la magnitude pertinente et la durée était la magnitude non pertinente, inversement pour la tâche temporelle. Avec 200 essais par bloc, chaque condition expérimentale était donc répétée 8 fois.

## Résultats

Afin de ne conserver que les données des participants ayant compris et réussi chaque tâche expérimentale, les résultats de 4 participants ont été écartés car l'un de leurs coefficients de corrélation (parmi les 2 blocs) était inférieur à 0,7. Ce qui laisse dans les analyses de statistiques inférentielles les réponses de 23 participants.

### Analyse des coordonnées Y de la souris

Pour chaque tâche, nous avons effectué une analyse de régression linéaire hiérarchique sur la variable dépendante (position du curseur sur l'axe vertical Y, en pixel) incluant la

variable "Magnitude pertinente" comme modèle nul, dont les modalités des variables "Magnitude pertinente" et "Magnitude non pertinente" ont été converties en z-scores afin d'obtenir des coefficients bêta standardisés (voir Tableau 2). L'analyse de régression de la tâche temporelle a confirmé que les participants exécutaient la tâche conformément aux instructions ( $R^2 = .369, \beta = .608, p < .001$ ), et que la variable "Magnitude non pertinente" ajoute une valeur prédictive supplémentaire en plus de la variable "Magnitude pertinente" seule ( $R^2 = .006, \beta = .075, p < .001$ ), révélant ainsi un effet Kappa significatif.

L'analyse de régression de la tâche spatiale a également confirmé que les participants exécutaient la tâche conformément aux instructions ( $R^2 = .202, \beta = .449, p < .001$ ), et que la variable "Magnitude non pertinente" ajoute une valeur prédictive supplémentaire en plus de la variable "Magnitude pertinente" seule ( $R^2 = .014, \beta = .118, p < .001$ ), révélant ainsi un effet Tau significatif (voir Tableau 2, et Figure 29).

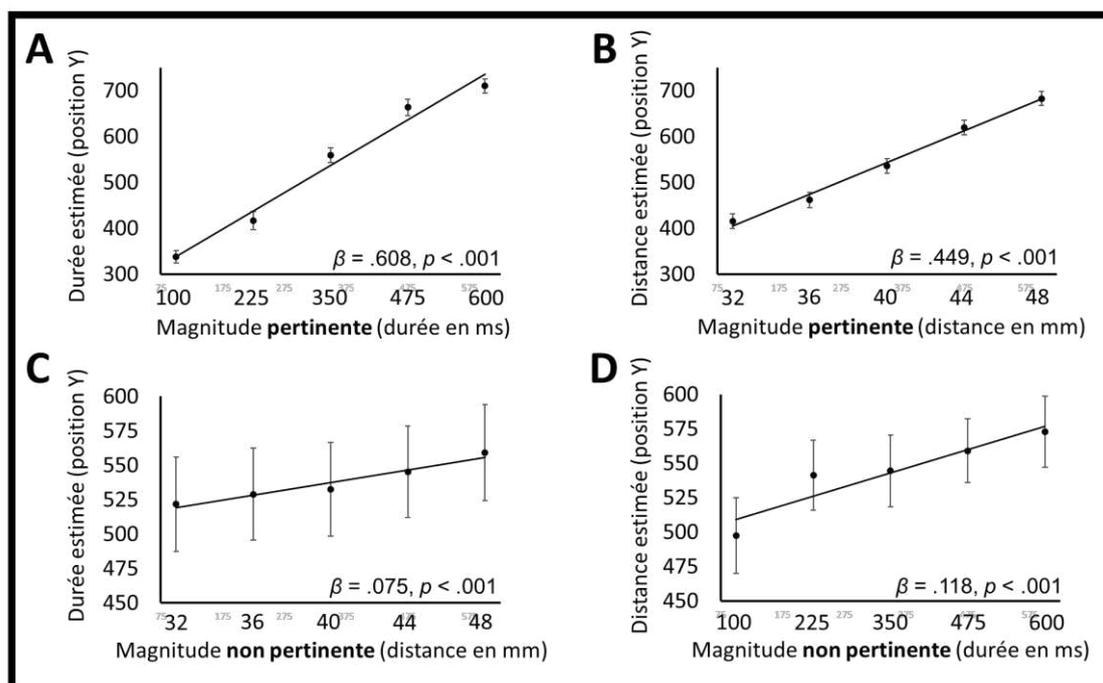
Tableau 2

Coordonnées Y et temps de réaction moyens en fonction du type de magnitude (Magnitude pertinente vs. Magnitude non pertinente), de la tâche (Temporelle vs. Spatiale) et des modalités de la magnitude.

Magnitude	Tâche	n	modalité	Coordonnée Y		Temps de réaction	
				Moyenne	(SE)	Moyenne	(SE)
Pertinente	Temporelle	(n=23)	100ms	337.73	(13.47)	808.76	(59.62)
			225ms	416.48	(19.51)	877.13	(59.64)
			350ms	559.53	(16.06)	880.33	(65.42)
			475ms	663.52	(17.69)	845.66	(63.71)
			600ms	710.47	(15.43)	818.77	(61.75)
	Spatiale	(n=23)	3.2°	415.36	(16.37)	815.36	(57.49)
			3.6°	461.77	(16.87)	837.40	(57.70)
			4°	536.10	(16.25)	865.82	(58.40)
			4.4°	619.40	(16.28)	845.77	(52.70)
			4.8°	682.34	(15.36)	831.08	(57.58)
Non pertinente	Temporelle (Kappa)	(n=23)	3.2°	521.75	(34.24)	817.11	(58.74)
			3.6°	528.99	(33.27)	826.09	(64.22)
			4°	532.49	(33.97)	854.52	(63.43)
			4.4°	545.24	(33.28)	869.13	(64.74)
			4.8°	559.26	(34.84)	863.80	(59.73)
	Spatiale (Tau)	(n=23)	100ms	497.28	(27.43)	822.94	(53.27)
			225ms	541.38	(25.45)	841.20	(59.00)
			350ms	544.44	(26.13)	843.17	(57.38)
			475ms	559.10	(23.18)	853.24	(58.58)
			600ms	572.77	(25.86)	834.90	(55.98)

Dans un second temps, afin de tester si l'effet Tau était supérieur à l'effet Kappa, nous avons effectué un t-test d'échantillons appariés avec les pentes de la variable "magnitude non

pertinente" (converties en scores z) pour chaque participant dans la tâche temporelle (représentant l'effet Tau) et les pentes de la variable "magnitude non pertinente" (convertie en scores z) pour chaque participant à la tâche spatiale (représentant l'effet Kappa). Comme prévu, les participants ont subi un effet Tau plus élevé ( $M = 26.98$ ,  $SD = 22.95$ ) que l'effet Kappa ( $M = 13.82$ ,  $SD = 13.66$ ) ( $t(22) = 3.19$ ,  $p = .002$ ).



**Figure 29.** Estimations moyennes (en pixels) des durées et des distances. (A) Effet de la durée réelle sur la durée estimée. (B) Effet de la distance réelle sur la distance estimée. (C) Effet de la distance réelle sur la durée estimée (effet Kappa). (D) Effet de la durée réelle sur la distance estimée (effet Tau).

#### Analyse des temps des réaction

Afin de vérifier si l'une des tâches requerrait une demande cognitive plus importante que l'autre, nous avons effectué une ANOVA à mesure répétée sur les temps de réaction, en fonction de la tâche (spatiale vs. temporelle), de la magnitude pertinente (5 modalités, 3,2/3,6/4/4,4/4,8° en tâche spatiale, et 100/225/350/475/600 ms en tâche temporelle) et de la

magnitude non pertinente (5 modalités, 100/225/350/475/600 ms en tâche spatiale, et 3,2/3,6/4/4,4/4,8° en tâche temporelle). Les résultats montrent qu'il y a une absence d'effet principal de la tâche ( $F(1, 22) = .02, p = .896, \eta^2p < .01$ ), ce qui permet de penser que les deux tâches requièrent une demande cognitive équivalente (voir Figure 30).

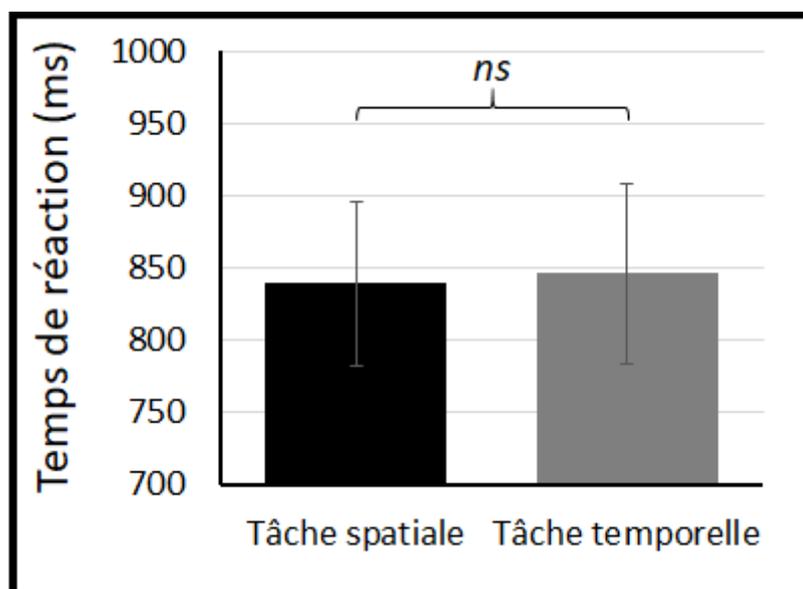


Figure 30. Temps de réaction en fonction de la tâche (temporelle/spatiale)

## Conclusion

Cette expérience avait pour objectif de répliquer les résultats obtenus lors des précédentes expériences, en utilisant un protocole expérimental optimisé. En outre, nous avons utilisé une variable dépendante quantitative continue. Dans les expériences précédentes, les participants devaient répondre de manière dichotomique dans une tâche de bissection, en répondant simplement par "plutôt courte" ou "plutôt longue". Ici, les participants pouvaient effectuer une estimation plus nuancée et plus précise, en cliquant sur une barre verticale avec le curseur de la souris pour effectuer leur estimation. De plus, cette expérience comportait un plus grand nombre de modalités de la variable "Magnitude non pertinente". Ainsi, la magnitude à ignorer n'était plus seulement composée des valeurs extrêmes comme ce fut le cas lors des

trois premières expériences. Nous avons inclus les trois valeurs intermédiaires à la variable "magnitude non pertinente", qui comportait donc 5 valeurs possibles. Nos analyses ont répliqué les résultats des expériences précédentes, en montrant un effet Tau supérieur à l'effet Kappa. De plus, les TRs des deux tâches n'étaient pas significativement différents, ce qui suppose que les ressources cognitives nécessaires à la résolution des deux tâches étaient équivalentes. Cette expérience consolide donc les résultats obtenus lors de nos précédentes expériences, car elle réplique nos résultats et écarte de potentiels biais méthodologiques pouvant jouer un rôle.

## **5.2 Expérience 5 – Performances inter-individuelles et effets d'interférence**

### Introduction

Si l'on se base sur les prédictions de la théorie AToM (Bueti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003), la précision d'un individu pour estimer une magnitude devrait refléter les performances de ce même individu pour estimer d'autres magnitudes. Cette affirmation pourrait également s'appliquer dans le cadre de la CMT (Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsy, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al., 2010), être performant pour estimer l'espace devrait indubitablement s'accompagner de bonnes performances pour estimer le temps et la numérosité. De plus, toujours selon les idées de la théorie AToM, les effets d'interférence auraient une origine commune, et interviendraient donc au même moment lors du processus d'estimation d'une magnitude. Nous avons d'ailleurs nous-même proposé que les effets Tau et Kappa pourraient intervenir lors de la phase d'accumulation pendant une estimation, suite aux résultats obtenus dans le 4<sup>ème</sup> chapitre. Cependant, nous avons pu constater à quel point la force de l'effet Tau était toute relative, et nécessitait un calibrage

particulier des tâches, et le respect de certains critères. Tandis que l'effet Kappa semble persistant et constant, excepté dans l'étude de Starr & Brannon (2016). C'est pourquoi, nous avons mis en place un nouveau protocole expérimental destiné à un nombre plus important de participants afin de s'interroger sur le potentiel lien entre ces performances et les effets d'interférence espace-temps. L'objectif de cette expérience était de mettre en relation les performances des participants, indexées par les ratios de Weber des participants dans les deux tâches ainsi que leurs temps de réactions, avec la force des effets Tau et Kappa de chaque participant. Pour cela, nous avons réutilisé un paradigme similaire à celui des expériences 2 et 4. Les participants ont donc dû effectuer deux tâches d'estimation, une tâche spatiale et une tâche temporelle, avec à chaque fois 5 modalités pertinentes à estimer (2 extrêmes et 3 intermédiaires). Pour créer des effets d'interférence, la magnitude non-pertinente (à ignorer), distance ou durée, variait aussi en 5 valeurs possibles. Cependant, nous avons pris la décision de conserver le système de réponse dichotomique des trois premières expériences. En effet, répondre en cliquant sur une barre verticale grise nécessite d'effectuer un mouvement de la main, qui n'est pas requis avec le système de réponse dichotomique. Par conséquent, ce système de réponse ralentit la cadence de défilement des essais, et donc la durée totale de l'expérience (puisque les participants mettent plus de temps pour répondre qu'avec le système dichotomique). De plus, effectuer un mouvement de la souris avec la main complexifie la réponse motrice et donc augmente la variabilité des TRs. Par conséquent, les TRs des participants sont moins représentatifs du coût cognitif des tâches lorsque la méthode de réponse est de cliquer le long de la barre verticale grise. Nous avons donc décidé pour cette expérience de conserver la méthode réponse dichotomique des expériences précédentes afin d'obtenir une mesure plus précise des ressources cognitives engagées des participants.

A ce stade, nous émettons l'hypothèse que, comme le suggèrent des deux principales théories modélisant le SCTM, les performances en ratios de Weber (WRs) et en ressources

cognitives engagées seront appariées dans chaque tâche. Nous pensons donc que les participants avec un WR bas (grande précision) dans l'une des tâches auront aussi un WR bas dans l'autre tâche, et que les participants avec des TRs rapides dans l'une des tâches (interprété comme : ayant engagé peu de ressources cognitives) auront aussi des TRs rapides dans l'autre tâche. Notez que cette hypothèse est relativement triviale dans le sens où même si la théorie du "système de traitement des magnitude" s'avérait finalement être erronée, notre hypothèse pourrait malgré tout être validée puisque cela pourrait tout simplement résulter de bonnes performances cognitives générales des participants. Un participant ayant de bonnes prédispositions cognitives, en forme, ayant parfaitement compris les instructions, étant habitué à passer des expériences, ou qui aurait l'habitude dans son quotidien de pratiquer des exercices stimulants voire entraînant ses capacités cognitives, sera potentiellement plus enclin à obtenir de bonnes performances dans les deux tâches de notre expérience. Enfin, la force de l'effet Tau semble grandement varier en fonction des critères des tâches, alors que l'effet Kappa semble difficilement atténuable (excepté dans l'étude de Starr & Brannon, 2016). Par conséquent, nous émettons l'hypothèse que la force de l'effet Tau des participants est relié aux ressources cognitives engagées ainsi qu'à la précision des participants dans la tâche spatiale, alors que l'effet Kappa des participants ne sera ni modulé en fonction des ressources cognitives engagées, ni modulé en fonction de la précision, lors de la tâche temporelle.

## Méthode

### Participants

Un total de 69 participants (dont 43 femmes ; 4 gauchers) âgés de 17 à 53 ans (moyenne 22,32 ans, écart type 7,64) ont participé à cette étude. Tous les participants ont été recrutés à l'Université Paul Valéry Montpellier 3 (France) et ont donné leur consentement écrit. L'étude a été réalisée selon les principes de la Déclaration d'Helsinki et en accord avec le Comité

d'Ethique du Département de Psychologie (Université Paul Valéry Montpellier). Tous ont rapporté avoir une vision normale ou corrigée.

### Appareillage

Un ordinateur disposant du logiciel E-Prime 2.0 software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) pour contrôler la présentation des stimuli, les différentes séquences chronométrées, et récolter les données. Les stimuli étaient présentés sur un écran de 15.6 pouces (1366 x 768 pixels, 60 Hertz). Les réponses étaient collectées en cliquant sur le clic gauche du pavé tactile avec l'index de la main droite ou sur le clic droit du pavé tactile avec le majeur de la main droite.

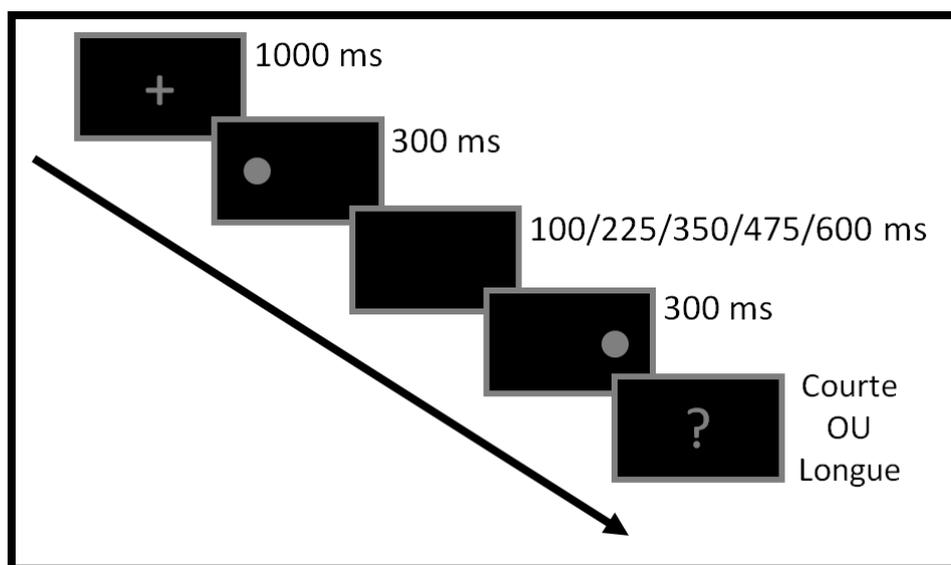
### Stimuli et procédure

Les participants étaient testés individuellement dans une pièce silencieuse, porte fermée. Les participants étaient assis sur une chaise, à 57cm de l'écran d'ordinateur sur lequel ils allaient passer l'expérience. Avant de commencer, il était demandé aux participants leur âge, leur sexe, et leur main dominante. Le matériel utilisé ainsi que la procédure employée étaient rigoureusement similaires au matériel et à la procédure de l'expérience 2, mais avec 5 magnitudes non-pertinentes, à l'instar des modalités des magnitudes non pertinentes de l'expérience 4. L'expérience commence donc avec une phase d'instruction (identique à celle de l'expérience 2), puis une phase d'exemple (identique à celles des expériences 2 et 4). Après cela, les participants pouvaient effectuer les blocs expérimentaux, dont l'ordre était contrebalancé au travers des participants.

Avant chaque tâche, le participant devait effectuer un entraînement (identique à celui de l'expérience 2) dont les consignes correspondaient aux consignes de la tâche en question

(entraînement sur les distances pour le bloc spatial, et entraînement sur les durées pour le bloc temporel). Lors de l'entraînement temporel, les durées affichées étaient celles précédemment présentées durant la phase d'exemples, avec 3 répétitions pour chaque essai (donc 12 essais). Lorsqu'une durée était présentée, selon les instructions, il devait cliquer soit à gauche soit à droite pour estimer la durée comme étant "courte" ou "longue". Après chaque réponse du participant, un feedback était donné (correct ! / non, la durée était courte/longue). L'entraînement spatial était similaire à l'entraînement temporel, excepté que les participants devaient juger les distances, et que les essais affichés correspondaient aux essais présentés en phase d'exemples pour montrer les différentes distances.

Comme pour l'expérience 2, chaque essai était constitué d'une croix de fixation pendant 1000 ms, d'un point gris pendant 300 ms, d'un écran noir pendant une durée variable (100/225/350/475/600 ms), d'un second point gris pendant 300 ms dont la distance avec le premier point gris variait aussi (3,2/3,6/4/4,4/4,8°), puis d'un écran de réponse avec un point d'interrogation gris sur fond noir au centre de l'écran (voir Figure 31).



**Figure 31.** Représentation schématique d'un essai de l'expérience 5.

La variable dépendante était la proportion de réponses "longue". L'expérience étant assez longue, une fenêtre s'affichait afin de proposer une courte pause au participant tous les 25 essais pendant des tâches expérimentales, celui-ci pouvait passer la pause quand il le désirait. La distance et la durée variaient de manière orthogonale dans les tâches. Dans la tâche spatiale la distance était la magnitude pertinente et la durée était la magnitude non pertinente, inversement pour la tâche temporelle. Chaque condition expérimentale était répétée 10, pour un total de 250 essais par tâche expérimentale. Dans l'expérience 4, il n'y avait que 8 répétitions par condition expérimentale, mais nous avons augmenté à 10 le nombre de répétitions afin d'obtenir des données plus précises des performances des participants.

## Résultats

Les résultats de 8 participants ont été écartés des analyses car leur précision dans l'estimation des magnitudes pertinentes extrêmes (la plus courte et la plus longue) durant les

blocs expérimentaux était trop faible. L'échantillon final correspondait donc à 61 participants ayant compris et ayant des performances correctes.

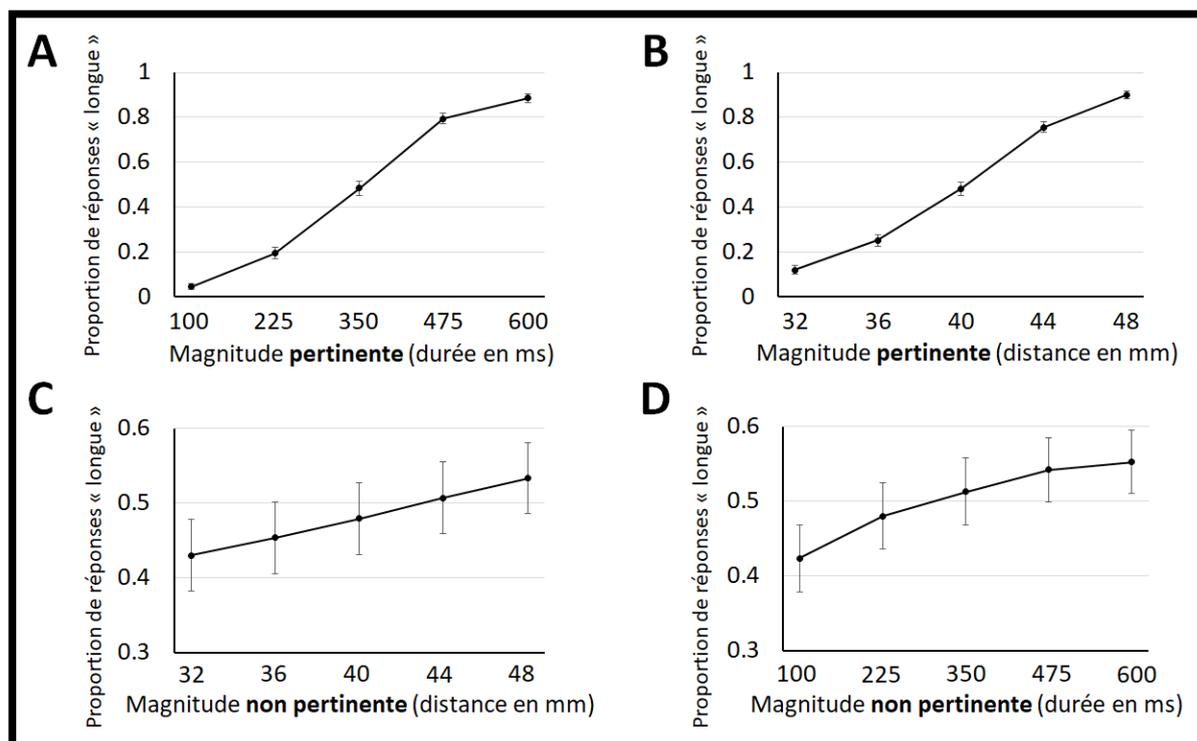
#### Analyse des proportions de réponses "longue"

Nous avons effectué une analyse de régression logistique hiérarchique sur la variable dépendante (proportion de réponses "longue") incluant la variable "Magnitude pertinente" comme modèle nul, dont les modalités des variables covariantes "Magnitude pertinente" et "Magnitude non pertinente" ont été converties en z-scores afin d'obtenir des coefficients bêta standardisés, avec la variable "tâche" comme facteur (voir Tableau 3). L'analyse révèle que les participants exécutaient les tâches conformément aux instructions ( $\beta = 91.76, SE = .021, Wald = 8419.95, p < .001$ ), et que la variable "Magnitude non pertinente" ajoute une valeur prédictive supplémentaire en plus de la variable "Magnitude pertinente" seule ( $\beta = 12.75, SE = .024, Wald = 162.66, p < .001$ ), révélant ainsi que les effets d'interférence sont significatifs (voir Figure 32 et Tableau 3). De plus, les résultats montrent un effet d'interaction entre la "Magnitude non pertinente" et la "tâche" ( $\beta = -2.06, SE = .034, Wald = 4.24, p = .039$ ), illustrant que l'effet d'interférence durant la tâche temporelle (effet Kappa) est moins important que l'effet d'interférence durant la tâche spatiale (effet Tau).

Tableau 3

*Proportions de réponses "longue" et temps de réaction moyens en fonction du type de magnitude (Magnitude pertinente vs. Magnitude non pertinente), de la tâche (Temporelle vs. Spatiale) et des modalités de la magnitude.*

Magnitude	Tâche	n	modalité	Proportion "longue"		Temps de réaction	
				Moyenne	(SE)	Moyenne	(SE)
Pertinente	Temporelle	(n=61)	100ms	.045	(.013)	430.09	(23.50)
			225ms	.194	(.026)	546.35	(30.90)
			350ms	.485	(.031)	580.78	(29.86)
			475ms	.795	(.023)	491.49	(26.37)
			600ms	.887	(.019)	438.93	(24.73)
	Spatiale	(n=61)	3.2°	.120	(.019)	505.79	(28.41)
			3.6°	.252	(.025)	590.85	(32.93)
			4°	.483	(.029)	637.26	(34.35)
			4.4°	.757	(.024)	587.88	(32.44)
			4.8°	.900	(.018)	498.16	(27.91)
Non pertinente	Temporelle (Kappa)	(n=61)	3.2°	.430	(.048)	473.90	(25.26)
			3.6°	.454	(.048)	494.13	(27.69)
			4°	.480	(.048)	501.48	(27.69)
			4.4°	.507	(.048)	511.10	(29.76)
			4.8°	.534	(.048)	507.04	(30.33)
	Spatiale (Tau)	(n=61)	100ms	.424	(.045)	574.03	(31.61)
			225ms	.480	(.044)	567.23	(32.01)
			350ms	.513	(.044)	540.13	(29.97)
			475ms	.542	(.043)	553.45	(31.48)
			600ms	.553	(.043)	585.11	(34.72)



**Figure 32.** Estimations moyennes (en proportion de réponses "longue") des durées et des distances. (A) Effet de la durée réelle sur la durée estimée. (B) Effet de la distance réelle sur la distance estimée. (C) Effet de la distance réelle sur la durée estimée (effet Kappa). (D) Effet de la durée réelle sur la distance estimée (effet Tau).

### Analyse des TRs et WRs

Nous avons ensuite calculé les temps de réaction ainsi que les WRs pour chaque participant, ainsi que les pentes Tau et Kappa en se basant sur les proportions de réponse "longue" en fonction de la variable "Magnitude non pertinente" dont les modalités ont été standardisées, pour chacune des tâches.

Nous avons en premier lieu effectué une ANOVA à mesures répétées sur les ratios de Weber en fonction de la tâche (spatiale vs. temporelle) et de la magnitude non pertinente (100/225/350/475/600 ms dans la tâche spatiale, et 3.2/3.6/4/4.4/4.8° dans la tâche temporelle). L'analyse révèle un effet significatif de la variable Tâche ( $F(1, 60) = 142.70, p < .001, \eta^2p = .70$ ), illustrant que les ratio de Weber sont plus bas

(meilleure précision) dans la tâche spatiale ( $M = .09$ ,  $SD = .04$ ) que dans la tâche temporelle ( $M = .24$ ,  $SD = .13$ ).

Une ANOVA sur les temps de réaction a aussi été réalisée, en fonction de la tâche (spatiale vs. temporelle), de la magnitude pertinente et de la magnitude non pertinente. Les résultats révèlent une différence significative des temps de réaction entre les deux tâches  $F(1, 60) = 16.99$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2p = .22$ ), suggérant que les participants étaient plus rapides durant la tâche temporelle ( $M = 497.53$ ,  $SD = 220.38$ ) que durant la tâche spatiale ( $M = 563.99$ ,  $SD = 250.05$ ). Cette ANOVA révèle également un effet principal de la magnitude pertinente  $F(4, 240) = 44.24$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2p = .42$ ). Ce résultat suggère que les participants sont plus lents pour estimer les magnitudes intermédiaires (225/350/475 ms dans la tâche temporelle, et 3.6/4/4.4° dans la tâche spatiale) que pour estimer les magnitudes extrêmes (100/600 ms et 3.2/4.8°).

Nous avons ensuite effectué quatre corrélations, et une régression linéaire multiple pour chaque effet d'interférence avec les variables covariantes "TR moyen dans la tâche temporelle", "TR moyen dans la tâche spatiale", "WR dans la tâche temporelle" et "WR dans la tâche spatiale".

La première corrélation avec les variables "WR dans la tâche spatiale" et "WR dans la tâche temporelle" montre que les WRs (de la tâche spatiale et de la tâche temporelle) sont positivement corrélés ( $r(59) = .256$ ,  $p = .046$ ). La deuxième corrélation avec les variables "TR dans la tâche spatiale" et "TR dans la tâche temporelle" montre elle aussi que les TRs dans les deux tâches sont positivement corrélés ( $r(59) = .741$ ,  $p < .001$ ). Ces deux premières corrélations démontrent donc que les participants ayant de bonnes performances dans l'une des tâches ont plus de chance d'avoir aussi de bonnes performances dans l'autre tâche, que ce soit en termes de WRs ou de TRs. La corrélation entre les variables "WR dans la tâche spatiale" et

le TR dans la tâche spatiale montre une corrélation positive significative ( $r(59) = .297, p = .020$ ). Une corrélation similaire est observée entre les variables "WR dans la tâche temporelle" et le TR dans la tâche temporelle mais elle n'atteint pas le seuil de significativité ( $r(59) = .240, p = .062$ ). Ces dernières corrélations semblent indiquer que plus un participant est lent à répondre, plus il est en difficulté pour discriminer les distances ou les durées (corrélation marginale pour ces dernières). Les WRs élevés révèlent une faible précision. Cela signifie que les participants qui mettent le plus de temps à répondre ne sont pas les plus précis, il ne s'agit donc pas d'un speed-accuracy trade-off. Les TRs seraient donc bien représentatifs du coût cognitif de la tâche.

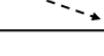
#### Analyse des pentes

La régression linéaire avec la "pente Tau" comme variable dépendante montre que la pente Kappa ne semble pas être corrélée à la pente Tau ( $R^2 = .008, \beta = -0.091, p > .05$ ), ce qui sous-entend une absence de corrélation entre les effets d'interférences Tau et Kappa (voir Tableau 4). Cette analyse révèle également que plus un participant a des TRs lents dans la tâche temporelle, plus la pente de l'effet Tau est importante ( $R^2 = .187, \beta = .432, p = .020$ ), et que plus un participant est rapide pour répondre dans la tâche spatiale, plus la pente de l'effet Tau est importante ( $R^2 = .142, \beta = -0.377, p = .044$ ). De plus, il semblerait que plus le WR spatial est bas (pour rappel, plus un ratio de Weber est petit, plus la précision du participant est grande), plus la pente Tau est importante ( $R^2 = .090, \beta = -0.300, p = .026$ ). Cependant, la précision dans la tâche temporelle ne semble pas jouer sur la pente Tau ( $R^2 = .002, \beta = -0.048, p > .05$ ).

Par ailleurs, la régression linéaire avec "la pente Kappa" comme variable dépendante ne met en évidence aucun effet significatif des variables covariantes, excepté un effet marginal de la précision dans la tâche temporelle ( $R^2 = .071, \beta = -0.267, p = .054$ ).

Tableau 4

Récapitulatif des différentes corrélations (une flèche vers le haut indique une corrélation positive, une flèche vers le bas indique une corrélation négative).

	Ratios de Weber (WR)		Temps de réaction (TR)	
	Tâche spatiale	Tâche temporelle	Tâche spatiale	Tâche temporelle
WR temporelle	 $r(59) = .256,$ $p = .046$			 $r(59) = .240,$ $p = .062$
TR spatiale	 $r(59) = .297,$ $p = .020$			 $r(59) = .741,$ $p < .001$
Pente Tau	 $R^2 = .090,$ $\beta = -0.300, p = .026$	<i>ns</i>	 $R^2 = .142,$ $\beta = -0.377, p = .044$	 $R^2 = .187,$ $\beta = .432, p = .020$
Pente Kappa	<i>ns</i>	 $R^2 = .071,$ $\beta = -0.267, p = .054$	<i>ns</i>	<i>ns</i>

## Conclusion

Cette expérience réplique une nouvelle fois l'asymétrie inverse des effets d'interférence, avec un effet Tau plus important que l'effet Kappa. De plus, elle montre que les performances des participants dans l'une des tâches sont corrélées avec leurs performances dans l'autre tâche. Les participants ayant une bonne précision en estimation spatiale sont plus enclins à avoir une bonne précision en estimation temporelle. Aussi, l'analyse de TRs nous amène à déduire que les participants ayant eu besoin d'engager peu de ressources cognitives pour effectuer une tâche ont aussi de plus grande chance d'être ceux ayant eu besoin d'engager peu de ressources cognitives pour effectuer l'autre tâche. Ce schéma de résultats est assez trivial, mais l'absence de corrélation entre performances spatiales et temporelles aurait des implications théoriques fortes. Notez que pour cette expérience, les tâches ne semblaient pas équilibrées comme l'étaient les précédentes, en termes de demande en ressources cognitives, puisque les temps de réaction en fonction de la tâche étaient différents.

Les analyses corrélationnelles mettant en lien les WRs et les TRs suggèrent que plus un participant est lent pour répondre, moins il est précis dans son analyse perceptive. Ce constat

permet d'illustrer que les participants ayant des TRs élevés ne sont pas lents simplement par "stratégie de réponse" afin d'être plus précis, mais parce qu'ils sont potentiellement moins performants dans ces tâches, et qu'ils doivent engager plus de ressources cognitives que les autres pour effectuer leurs estimations.

Les régressions linéaires multiples tendent à démontrer que l'effet Tau semble dépendre du degré d'engagement cognitif du participant dans la tâche, puisque l'effet Tau s'accroît pour les participants qui répondent plus vite durant la tâche spatiale. Il s'accroît également pour les participants qui sont précis dans leurs estimations de distance. En revanche, l'effet Kappa n'est pas modulé par le degré d'engagement dans la tâche.

Notez que le lien entre précision et effets d'interférence (plus on est précis dans une tâche, plus l'effet d'interférence est élevé) peut sembler surprenant puisque l'on pouvait s'attendre à ce que plus un participant se fait influencer par la magnitude non pertinente, plus il fait d'erreurs. Cependant, un participant ayant plus de difficultés à estimer les magnitudes fera plus d'erreurs aléatoires, ce qui fera tendre ses pentes de proportion de réponses "longue" vers une valeur nulle. Il en résulte une atténuation de l'inclinaison des pentes Tau et Kappa. De plus, un participant ayant des difficultés sera nécessairement moins enclin à se faire influencer par une magnitude s'il a de base des difficultés à estimer cette magnitude.

Ces résultats sont intéressants, car ils montrent que l'augmentation des TRs et l'émergence de l'effet Tau dus à la réduction de la discriminabilité des distances (voir expérience 2) sont deux phénomènes qui sont, selon nous, consécutifs de l'augmentation en demande cognitive, mais non causaux entre eux. L'apparition de l'effet Tau ne provoque pas l'augmentation des TRs, et réciproquement, l'augmentation des TRs n'est pas ce qui provoque l'apparition de l'effet Tau. En effet, on constate que plus un participant est lent durant la tâche spatiale, plus son effet Tau sera important. De plus, le caractère invariable de l'effet Kappa en

fonction des ressources cognitives engagées constitue un argument pour penser que les effets Tau et Kappa seraient issus de mécanismes cognitifs différents et qu'ils interviennent à des moments différents durant l'estimation des magnitudes. Selon cette idée, nous faisons l'hypothèse que l'effet Tau se produit lors de la phase du traitement des informations spatiales en mémoire de travail. Cela expliquerait le lien étroit entre Tau et les ressources cognitives engagées. L'effet Kappa émergerait quant à lui probablement dans une phase plus précoce du processus d'estimation, selon nous. Au regard de la théorie de l'horloge interne (Gibbon et al., 1984), représentant le processus d'estimation du temps (voir Figure 4) nous pensons que l'effet Kappa proviendrait d'une phase antérieure à la phase d'accumulation des informations temporelles en mémoire de travail.

## Discussion

Nos recherches nous ont amené à nous questionner plus en profondeur sur le potentiel lien entre les effets d'interférence espace-temps et les ressources cognitives engagées dans l'estimation du temps et de l'espace. Dans un premier temps, nous avons pu écarter la possibilité de l'existence de certains biais méthodologiques, en proposant une 4<sup>ème</sup> expérience revisitant notre paradigme de base. Les participants ne devaient plus répondre de manière dichotomique, mais de manière continue en cliquant sur une barre grise verticale. Plus ils estimaient la magnitude comme étant courte ou longue, plus ils devaient cliquer vers une des extrémités de la barre, faisant de notre variable dépendante une variable quantitative continue. De plus, nous avons aussi instauré 5 modalités pour la magnitude non pertinente (contre seulement 2 lors des expériences 1, 2 et 3), afin d'éviter un éventuel effet de la correspondance des pôles (théorie de la *Polarity Correspondence* élaborée par Proctor et Cho ; voir Proctor & Cho, 2006). Selon cette théorie, les participants sont susceptibles d'associer une valence soit négative, soit positive, à chaque stimuli, entraînant au passage une association gauche/droite

en fonction de la valence attribuée aux stimuli. En outre, le fait de n'utiliser que 2 modalités pour la magnitude non pertinente aurait, potentiellement, pu engranger un phénomène de correspondance des pôles. Cela aurait constitué une variable parasite pouvant expliquer les effets d'interférences mis en évidence dans les résultats des précédentes expériences. Néanmoins, nos résultats ont répliqué ceux obtenus lors des précédentes expériences. Ils mettent en évidence une supériorité de l'effet Tau par rapport à l'effet Kappa, lorsque la demande en ressources cognitives est accrue dans la tâche spatiale. Nous avons ensuite pu mettre en place une 5<sup>ème</sup> expérience en utilisant les mêmes 5 modalités non pertinentes que dans l'expérience 4, mais en gardant la méthode de réponse dichotomique afin d'avoir une mesure plus précise des TRs, afin que ces TRs représentent mieux les ressources cognitives engagées par les participants. L'objectif était d'étudier les potentiels liens entre les performances des participants et l'intensité des effets d'interférence. Nous avons ainsi encore une fois pu répliquer l'asymétrie  $\text{Tau} > \text{Kappa}$ , et mettre en évidence des corrélations positives entre la précision et les ressources cognitives engagées des participants dans chacune des tâches. Plus un participant est précis lors d'une tâche d'estimation, plus il est rapide (suggérant qu'il engagerait moins de ressources cognitives), et plus il a de chance d'être précis aussi lors de l'autre tâche d'estimation. Nous avons également constaté que plus un participant est précis, plus il subit l'effet d'interférence. Enfin, le résultat le plus novateur de cette expérience est le fait que la force de l'effet Tau semble dépendre des ressources cognitives engagées dans l'estimation spatiale. Plus un participant est rapide pour estimer des distances, plus il subit un effet Tau important. Ce résultat est intéressant car nous savons qu'il est nécessaire que la tâche spatiale requière un coût cognitif important pour l'émergence de l'effet Tau. Or, il semblerait que moins les participants ont besoin d'engager des ressources cognitives pour estimer les distances (TRs rapides), plus leur effet Tau est important. Ce constat illustre le fait que réduire la discriminabilité des distances force les participants à se concentrer davantage sur la tâche,

augmentant la force de Tau, et que ceux qui se concentrent plus efficacement subissent un effet Tau encore plus important. Ainsi, plus un participant est efficace pour estimer des distances (grande précision et TRs rapides), plus il est impacté par l'effet Tau. L'autre constat très intéressant que l'on peut tirer de cette expérience est que l'effet Kappa semble n'être corrélé d'aucune manière avec les ressources cognitives engagées des participants. Comme nous le pensions, l'effet Kappa ne varie pas en fonction des TRs.

Pour approfondir nos analyses, une analyse de distributions appelée "vincentisation" aurait pu être réalisée. Cette technique, initialement développée par Vincent (1912) et réhabilitée par Ratcliff (1979) permet d'obtenir une distribution des observations en fonction des temps de réaction obtenues dans une même condition expérimentale. Une vincentisation aurait pu être conduite pour analyser le taux de réponses "long" en fonction de la rapidité de la réponse. Le principe serait de classer les réponses par ordre croissant pour chaque condition expérimentale, puis de diviser les réponses des participants en groupes équivalents. Ensuite, pour chaque groupe dans chaque condition expérimentale et pour chaque participant, le pourcentage de réponses "long" serait calculé. Ce pourcentage refléterait la force des effets Tau et Kappa. En créant 4 groupes de réponses, de très lent, à lent en allant vers rapides puis très rapides, on aurait l'opportunité d'investiguer le lien précision-rapidité chez un même participant. L'objectif final serait de répliquer les résultats obtenus sur les différences interindividuelles, avec des analyses de distribution qualifiant les réponses d'un même participant. Les liens entre performances aux tâches spatiales et temporelles et la force des effets Tau et Kappa pourraient être étudiés sur des données intra-individuelles. Ce système d'analyse des données constitue une perspective intéressante qui mérite que l'on s'y attarde à l'avenir.

Ainsi, bien que le lien entre "effet Tau" et "ressources cognitives" semble maintenant établi, il ne semble pas exister de lien similaire avec l'effet Kappa. Cette idée suggère que les

processus en cause dans l'apparition des effets Tau et Kappa sont probablement différents. Aux vues de la littérature actuelle et de nos résultats, nous pensons que l'effet Tau est lié au processus d'accumulation et donc à la mémoire de travail, tandis que l'effet Kappa semble naître à un stade plus précoce durant l'estimation, antérieur à l'apparition de l'effet Tau.

## Chapitre 6 : Effets d'interférence et émotions

### Introduction

Les émotions sont capables d'influencer certains processus cognitifs. Elles peuvent par exemples améliorer les capacités attentionnelles (Alpers & Gerdes, 2007 ; Alpers et al., 2005 ; Anderson & Shimamura, 2005 ; Anderson & Phelps, 2001 ; Yang, Zald, & Blake, 2007), ou les perturber (Most, Chun, Widders, & Zald, 2005 ; Fox, Russo, Bowles, & Dutton, 2001 ; Smith, Most, Newsome, & Zald, 2006). De plus, il a été démontré que les émotions pouvaient optimiser la mémoire, en améliorant l'encodage, le stockage et la restitution d'informations (Berlyne, 1969 ; Brown & Kulik, 1977 ; Craik, Govoni, Naveh-Benjamin, & Anderson, 1996 ; Heuer & Reisberg, 1992 ; Kleinsmith & Kaplan, 1963 ; Lindsay, Read, & Sharma, 1998 ; Loftus, Loftus & Messo, 1987 ; McGaugh, 2000). Les émotions jouent également un rôle capital dans nos prises de décisions, puisque certains choix sont faits dans l'attente de ressentir une émotion positive consécutive de ces choix (Bechara, Damasio, Tranel & Damasio, 1997, 2005 ; Brosch et al., 2011 ; Brosch, Coppin, Schwartz & Sander, 2012).

Le système commun du traitement des magnitudes n'est à priori pas non plus épargné par l'impact des émotions. De nombreuses études, généralement portant sur l'effet d'émotions négatives à fort arousal sur les estimations de magnitudes, ont montré que ces émotions provoquaient une surestimation des durées, une sous-estimation de la numérosité, mais aucun effet sur les estimations spatiales (Baker et al., 2013 ; Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011 ; Hamamouche et al., 2017 ; Lui, Penney & Schirmer, 2011 ; Tipples, 2008 ; Young & Cordes, 2013). Ce constat est problématique au regard des théories du SCTM, notamment de la théorie AToM (Buetti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003). Selon les principes de cette théorie, l'influence des émotions sur les estimations devrait nécessairement être

semblable d'une magnitude à l'autre. Ainsi, l'influence des émotions sur l'estimation des magnitudes devrait provoquer soit la sous-estimation de toutes les magnitudes, soit une surestimation de toutes les magnitudes.

Néanmoins, une étude (Droit-Volet, 2013) a permis de nuancer les conclusions de la littérature. Cette étude démontre qu'en utilisant des stimuli non-séquentiels, les résultats habituellement obtenus dans la littérature sont répliqués, les émotions provoquent une sous-estimation de la numérosité, et aucun impact sur l'espace. En revanche, lorsque des stimuli séquentiels sont utilisés (ce qui est par nature inhérents aux stimuli temporels), l'effet de l'émotion provoque alors une surestimation de la numérosité et l'espace, similaire à celle qui se produit dans les estimations de durées.

Suite aux études réalisées dans les chapitres 4 et 5, nous avons constaté que l'effet Tau semble dépendant des ressources cognitives engagées dans la tâche spatiale, alors que l'effet Kappa est robuste et apparemment indépendant de ces ressources. Nous avons par conséquent émis l'hypothèse que l'effet Tau est susceptible d'émerger durant le traitement des informations en mémoire de travail. Nous avons également fait l'hypothèse que l'effet Kappa intervient à un stade antérieur à la phase d'accumulation durant le processus d'estimation temporel. Dans le prolongement des travaux de Droit-Volet (2013), et avec l'objectif de mettre à l'épreuve nos hypothèses sur l'origine des effets Tau et Kappa, nous avons entrepris d'étudier le lien Émotions-Magnitudes, et plus particulièrement la relation entre les émotions et les effets d'interférence. L'objectif est d'étudier l'impact d'une émotion négative à fort arousal sur les interférences espace-temps. A notre connaissance aucun travail expérimental n'a à ce jour étudié l'effet des émotions sur les effets d'interférence entre les magnitudes. Un protocole expérimental basé sur des inductions émotionnelles qui précèdent la réalisation de tâches spatiale et temporelle avec des stimuli séquentiels a été mis en place.

## 6.1 Expérience 6 – L'impact des émotions sur les effets d'interférence

### Introduction

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier l'impact des émotions sur nos estimations spatiales et temporelles, ainsi que sur les effets Tau et Kappa. Pour cela, nous avons mis en place une expérience avec un protocole d'induction émotionnelle. Le but d'une induction émotionnelle est d'employer un protocole expérimental permettant de provoquer un certain état émotionnel chez le participant. Classiquement, les inductions émotionnelles sont produites à l'aide d'images (Codispoti, Bradley & Lang, 2001 ; Lang, 2005 ; Lang, Bradley & Cuthbert, 1997 ; Mikels et al., 2005), de scènes de film (Gross & Levenson, 1995 ; Rottenberg et al., 2002), ou de musiques (Martin & Metha, 1997 ; Niedenthal & Setterlund, 1994 ; Vieillard et al., 2008 ; Witvliet & Vrana, 1996). Pour notre part, nous avons décidé d'utiliser une méthode d'induction émotionnelle déjà employée dans la littérature (López-Benítez, Coll-Martín, Carretero-Dios, Lupiáñez & Acosta, 2020 ; Pacheco-Unguetti, Acosta, Callejas & Lupiáñez, 2010 ; Pacheco-Unguetti, Acosta & Lupiáñez, 2014), consistant à utiliser des images et des textes, auxquels nous avons ajouté des bandes sons. Ce protocole expérimental d'induction émotionnelle présente l'intérêt d'être récent et novateur, de solliciter plusieurs modalités sensorielles, et d'avoir été éprouvé sur des participants espagnols, et désormais avec les participants de cette expérience. Pour mesurer l'efficacité des inductions émotionnelles, nous avons fait passer des questionnaires de ressentis émotionnels aux participants, à plusieurs reprises tout au long de l'expérience, afin qu'ils puissent auto-évaluer leur état émotionnel. Ces questionnaires sont le SAM (*Self Assessment Manikin*, Bradley & Lang, 1994) et l'EVEA (*La Escala de Valoración del Estado de Ánimo*, Sanz, 2001), que nous détaillerons dans la partie méthode.

L'expérience était donc composée de 4 blocs expérimentaux. Parmi ces 4 blocs, deux étaient effectués après une induction émotionnelle de valence négative, et les deux autres après une induction de valence neutre. Pour chaque condition émotionnelle, les participants devaient réaliser une tâche d'estimation spatiale et une tâche d'estimation temporelle (similaires aux tâches spatiales et temporelles de l'expérience 2). Nous avons choisi d'utiliser la valence négative car les études montrant un effet des émotions sur les estimations de magnitude emploient des émotions à valence négative, qui semblent impacter les estimations de manière plus importante que les émotions à valence positive.

Les participants ont été répartis en deux groupes. Les participants du premier groupe ont subi une induction de peur (émotion négative à fort arousal), tandis que les participants de l'autre groupe ont subi une induction de dégoût (émotion négative à faible arousal : Wiem & Lachiri, 2017). L'idée est que, puisque c'est la combinaison "valence négative" et "fort arousal" qui entraîne une surestimation du temps, nous souhaitons également voir si cette différence d'effet de l'émotion en fonction de l'arousal était similaire pour les estimations spatiales. L'objectif de l'étude était donc de tester l'impact des émotions (à fort et à faible arousal) sur les estimations temporelles et spatiales d'une part, ainsi que sur les effets Tau et Kappa d'autre part.

Au regard de la littérature, nous nous attendions à ce que les distances soient surestimées dans le groupe "Peur" au même titre que les durées, à l'instar des résultats obtenus par Droit-Volet en 2013. En effet, les stimuli utilisés dans cette expérience sont séquentiels, la durée et la distance qui séparent les 2 points flashés à l'écran doivent donc être construites sur la base d'informations qui défilent devant nos yeux. Concernant le groupe "dégoût", nous nous attendions à obtenir peu voire pas d'effet de cette émotion sur les estimations de durées et de distances (Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011 ; Tipples, 2008).

Au niveau des effets d'interférence en revanche, nos hypothèses sont un peu plus exploratoires puisqu'aucune autre étude, à notre connaissance, ne s'est penchée sur les potentiels effets des émotions sur les effets Tau et Kappa. Néanmoins, de nombreuses études dans la littérature rapportent et décrivent que les émotions négatives à fort arousal perturbent nos estimations temporelles (Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011 ; Tipples, 2008). De plus, Droit-volet (2013) a montré que lorsque les stimuli sont séquentiels, l'espace pouvait lui aussi être surestimé. Nous émettons donc l'hypothèse que les effets Tau et Kappa seront tous deux modulés par l'émotion de Peur. Cependant, suivant l'hypothèse que l'effet Tau et l'effet Kappa interviendraient à différentes étapes de l'estimation des magnitudes, des effets différenciés pourraient être observés sur les interférences Tau et Kappa dans des contextes émotionnels.

## Méthode

### Participants

Un total de 68 participants (dont 55 femmes ; tous droitiers) âgés de 17 à 29 ans (moyenne 20,58 ans, écart type 2,24) ont participé à cette étude. Tous les participants ont été recrutés à l'Université Facultad de Psicología de la UGR à Grenade (Espagne) et ont donné leur consentement écrit. L'étude a été réalisée selon les principes de la Déclaration d'Helsinki et en accord avec le Comité d'Éthique du Département de Psychologie (Université Paul Valéry Montpellier). Tous ont rapporté avoir une vision normale ou corrigée.

### Appareillage

Un ordinateur disposant du logiciel E-Prime 2.0 software (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) pour contrôler la présentation des stimuli, les différentes séquences

chronométrées, et récolter les données. Les stimuli étaient présentés sur un écran de 24.4 pouces (1920 x 1080 pixels, 60 Hertz). Les réponses étaient collectées en déplaçant et en cliquant sur le bouton gauche d'une souris avec la main droite.

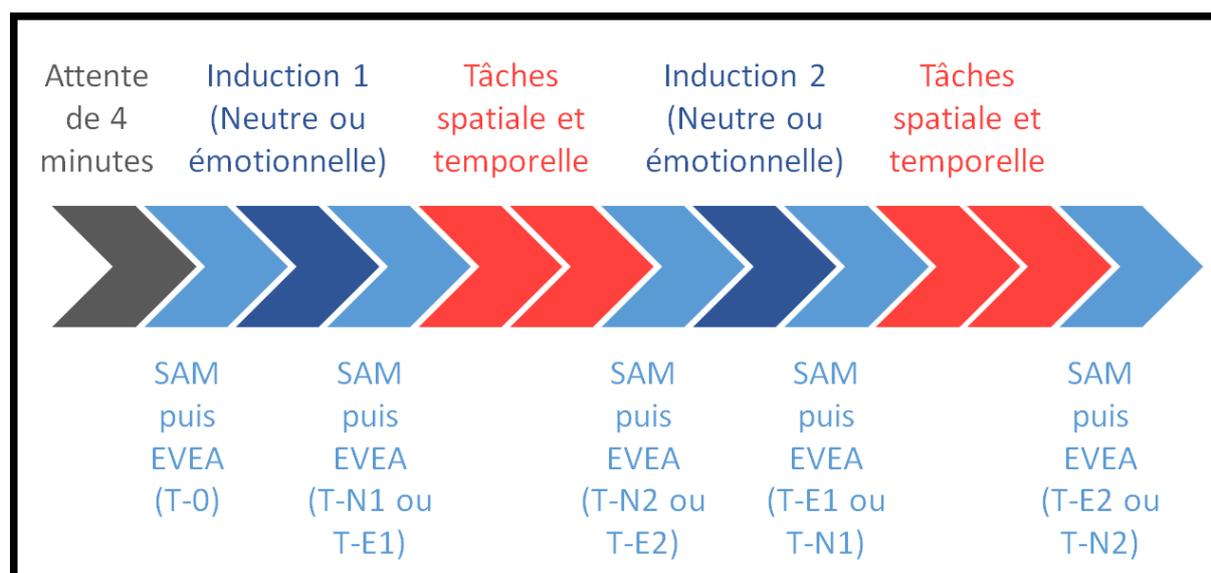
### Stimuli et procédure

Les participants étaient testés individuellement dans une pièce sans lumière et silencieuse, porte fermée. Le paradigme expérimental était similaire à celui utilisé dans l'expérience 4. Les participants étaient assis sur une chaise, à 57cm de l'écran d'ordinateur sur lequel ils allaient passer l'expérience. Avant de commencer, il était demandé aux participants leur âge, leur sexe, et leur main dominante (seul(e)s les droitier(è)s pouvaient participer).

Il y avait deux groupes de participants, l'un avec une induction de peur, l'autre avec une induction de dégoût. Chaque participant devait dans un premier temps attendre 4 minutes, le temps que leur état émotionnel se stabilise avant de commencer l'expérience. Une phase d'exemples démarrait ensuite, composée premièrement d'un exemple de durée courte (100 ms) et de durée longue (600 ms), sans variation de distance ( $4^\circ$ ), chacune répétée deux fois (une fois de gauche à droite, puis de droite à gauche l'autre fois). Suivait un exemple de distance courte ( $3,2^\circ$ ) et de distance longue ( $4,8^\circ$ ), sans variation de durée (350 ms), répétée deux fois (une fois de gauche à droite, puis de droite à gauche l'autre fois). Le participant se voyait ensuite proposer une phase d'entraînement d'estimation des durées. Les durées affichées étaient celles précédemment présentées durant la phase d'exemples, avec 5 répétitions pour chaque essai (donc 20 essais). Après la présentation du second stimulus, le participant devait juger la durée écoulée en cliquant sur une barre grise verticale ( $0,5^\circ$  de largeur et  $17,9^\circ$  de hauteur) qui s'affichait au milieu de l'écran. Selon les instructions, il devait cliquer plutôt vers le haut ou plutôt vers le bas de la barre pour estimer une durée comme étant respectivement "courte" ou "longue". Après chaque réponse du participant, un feedback était donné (correct ! / non, la

durée était plus courte/longue). Pour cette phase d'entraînement, si un participant cliquait trop près du centre de la barre (moins de 54 pixels d'écart avec le centre de la barre), sa réponse était considérée comme fautive. Une fois ce premier entraînement terminé, les participants effectuaient un entraînement sur les distances. Cet entraînement est similaire à celui des durées, excepté que les participants devaient juger les distances. Chaque essai était présenté 5 fois (donc 20 essais d'entraînement).

Il était ensuite demandé aux participants de répondre à un questionnaire EVEA (*La Escala de Valoración del Estado de Ánimo*, Sanz, 2001) ainsi qu'un questionnaire SAM (*Self Assessment Manikin*, Bradley & Lang, 1994). Puis, une première phase d'induction était lancée (induction neutre ou induction émotionnelle (peur ou dégoût, selon le groupe de participant), suite à quoi le participant devait de nouveau répondre à un questionnaire EVEA ainsi qu'un questionnaire SAM. Après cette première induction, le participant devait effectuer les deux premiers blocs expérimentaux (un bloc spatial et un bloc temporel, dont l'ordre était contrebalancé au travers des sujets). Après cette phase de bloc expérimentaux, les participants étaient de nouveau invités à répondre aux questionnaires (EVEA et SAM). La deuxième partie de l'expérience commençait par l'autre phase d'induction, s'en suivait de nouveau les questionnaires, puis les participants devaient effectuer les deux derniers blocs expérimentaux (un bloc spatial et un bloc temporel, dont l'ordre était identique à l'ordre des deux blocs expérimentaux de la première partie de l'expérience). Enfin, les participants devaient répondre une dernière fois aux questionnaires SAM et EVEA (voir Figure 33).

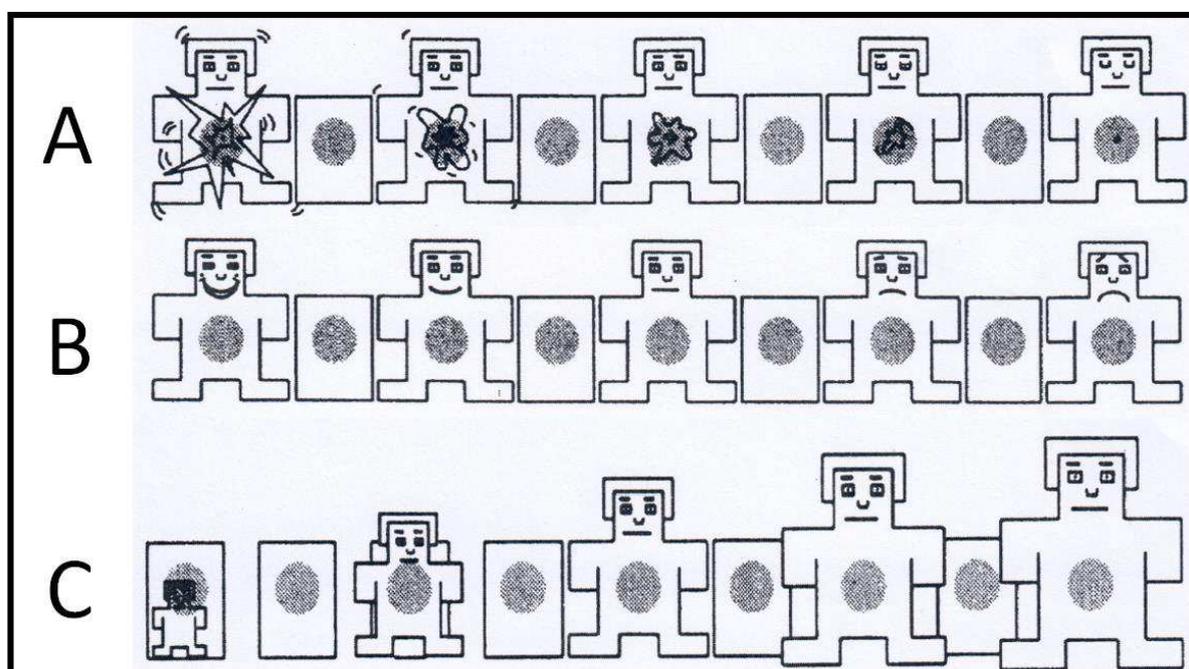


**Figure 33.** Représentation schématique du déroulement de l'expérience.

Le questionnaire EVEA permet d'estimer les émotions que le participant pense ressentir. Il est initialement composé de 4 affirmations par émotion évaluée. Le questionnaire de base interroge sur l'état émotionnel du participant vis-à-vis de son sentiment de tristesse, d'anxiété, de colère et de joie. Pour adapter le questionnaire à l'induction de dégoût, nous avons ajouté 4 nouvelles affirmations afin d'interroger le participant sur son sentiment de dégoût. Le questionnaire EVEA utilisé était donc composé de 20 affirmations, apparaissant les unes après les autres, centrées dans la partie supérieure de l'écran, en noir sur blanc. Les participants devaient cliquer avec la souris sur l'échelle correspondante située au centre dans la partie inférieure de l'écran. L'échelle allait de 0 à 10, indiquant à quel point le participant était d'accord vis-à-vis de l'affirmation affichée à l'écran.

Le questionnaire SAM permet d'estimer l'état émotionnel dans lequel le participant pense être. Il est composé de 3 questions, l'une portant sur la valence de l'état émotionnel, l'une sur l'arousal, et une sur la sensation de dominer ses émotions. Les participants devaient estimer leur état émotionnel en cliquant sur une échelle illustrée allant de 1 à 9 (de gauche à droite, voir Figure 34). Notez qu'un score élevé sur l'échelle d'arousal suggère que le

participant est calme (faible arousal), un score élevé sur l'échelle de valence suggère que le participant se sent plutôt d'humeur négative (valence négative), et un score élevé sur l'échelle de dominance suggère que le participant a la sensation de dominer ses émotions.



**Figure 34.** Échelles de réponses du test SAM (*Self Assessment Manikin*, Bradley & Lang, 1994), pour l'arousal (A), la valence (B) et la dominance (C).

Chaque induction était composée de 10 diaporamas de 15 secondes, avec une bande son. Chaque diaporama commençait par une seconde d'écran noir, puis un texte apparaissait pendant 14 secondes. A la 5<sup>ème</sup> seconde d'affichage du texte, une image apparaissait sous le texte durant les 9 secondes restantes. Chaque induction durait ainsi 2 minutes et 30 secondes. L'induction NEUTRE affichait des textes et des images basiques, à valence neutre, et la bande son émise était un enregistrement de 2min30 du bruit d'une cascade en forêt. Les inductions de PEUR et de DÉGOÛT affichaient les mêmes images, mais les textes affichés ainsi que les bandes son étaient différents. Les images utilisées ont été obtenues sur une base de données d'images à caractère émotionnelle, l'International Affective Picture System (Lang, Bradley & Cuthbert, 1997). La bande son de l'induction de peur était un morceau de la première partie

d'"Oktophonie", une musique électronique composée par Karlheinz Stockhausen. La bande son de l'induction de dégoût était un morceau de la "Thrène à la mémoire des victimes d'Hiroshima", une musique contemporaine composée par Krzysztof Penderecki. Notez que les bandes sonores n'étaient pas rythmées.

Au niveau des choix des conditions expérimentales, la magnitude non pertinente se déclinait en 2 modalités (les magnitudes extrêmes, à l'instar de l'expérience 2). Nous avons opté pour 8 répétitions par condition expérimentale. L'expérience dure particulièrement longtemps (deux inductions, 5 questionnaires SAM, 5 questionnaires EVEA, et 4 blocs expérimentaux). De plus, puisque notre objectif est d'étudier le lien entre les émotions et les magnitudes (ainsi que les effets d'interférences), plutôt que sur le coût cognitif, nous avons décidé d'utiliser une méthode de réponse similaire à celle de l'expérience 4, avec la barre grise verticale. L'avantage de cette méthode est qu'elle nous permet d'obtenir des données plus précises sur les petites variations des estimations des participants. Bien que ce soit au détriment d'une moins bonne pertinence des temps de réaction (puisque'il ne suffit pas de simplement faire un clic), nous espérons ainsi pouvoir mettre en évidence l'impact des émotions sur les magnitudes et les effets d'interférence, de manière plus précise.

Ainsi, les tâches expérimentales étaient identiques aux tâches expérimentales de l'expérience 4 (voir Figure 28), excepté qu'il n'y avait que les modalités extrêmes pour la magnitude non-pertinente (à l'instar de l'expérience 2). Ainsi, chaque bloc était composé de 80 essais (5 magnitudes pertinentes, 2 magnitudes non-pertinentes, 2 directions (gauche-droite ou droite-gauche), 2 points de départ ( $1,07^\circ$  d'écart entre le point de départ 1 et le point de départ 2), et 2 répétitions pour chaque essai). Il n'y avait cependant pas de pause durant les blocs expérimentaux de cette expérience. Les participants devant effectuer deux fois le bloc temporel et deux fois le bloc spatial (une passation par induction), ils ont donc répondu à 320 essais au total.

## Résultats

Afin de ne conserver que les données des participants ayant compris et réussi chaque tâche expérimentale, les résultats de 12 participants ont été écartés car l'un de leurs coefficients de corrélation entre leurs coordonnées Y et les distances/durées objectives à estimer (parmi les 4 blocs) était inférieur à 0,7. Nous avons donc analysé les données de 27 participants pour le groupe "Dégout" et de 29 participants pour le groupe "Peur".

### Test SAM du groupe "peur"

Nous avons dans un premier temps voulu tester si l'induction de peur avait eu un impact significatif sur l'état émotionnel des participants (voir Tableau 5). Nous avons effectué des t-test pour comparer les résultats des tests SAM à N1, c'est-à-dire avant les blocs neutres (donc après l'induction neutre) avec ceux des tests SAM à E1, c'est-à-dire avant les blocs émotionnels (donc après l'induction de peur), N1 vs. E1 (avant les blocs expérimentaux). Puis, nous avons comparé les résultats des tests SAM à N2 après les blocs neutres avec ceux des tests SAM à E2, après les blocs émotionnels, N2 vs. E2 (après les blocs expérimentaux).

Les résultats sur l'arousal montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont moins importants qu'en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(28) = -3.45, p = .002$ , et N2 vs. E2,  $t(28) = -2.38, p = .024$ ).

Les résultats sur la dominance montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants ne sont pas significativement différents des scores en condition Neutre avant les blocs expérimentaux (N1 vs. E1,  $t(28) = -1.78, p = .086$ ), mais les scores sont plus faibles en condition Émotionnelle qu'en condition Neutre après les blocs expérimentaux

(N2 vs. E2,  $t(28) = -2.66, p = .013$ ). Or, un score de dominance faible au test SAM signifie que les participants ont la sensation d'être dominé par leurs émotions.

Les résultats sur la valence montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus élevés qu'en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(28) = 5.37, p < .001$ , et N2 vs. E2,  $t(28) = 2.70, p = .012$ ). Or, on sait qu'un score de valence élevé au test SAM signifie que les participants sont dans un état émotionnel négatif.

Tableau 5

Scores moyens aux tests SAM et EVEA pour chaque groupe, à Temps-0 (tout début de l'expérience ; T-0), N1, N2, E1 et E2.

Groupe	Test		T-0		N1		N2		E1		E2	
			Moyenne	(SE)								
Groupe "Peur"	SAM	Arousal	5.41	(.37)	5.90	(.33)	6.03	(.39)	4.83	(.42)	4.97	(.47)
		Dominance	5.41	(.32)	4.62	(.32)	5.07	(.34)	3.93	(.35)	3.90	(.33)
		Valence	3.86	(.32)	4.28	(.28)	4.90	(.29)	6.10	(.32)	5.52	(.34)
	EVEA	Tristesse	2.66	(.39)	2.49	(.40)	2.28	(.41)	4.12	(.42)	2.72	(.45)
		Anxiété	3.40	(.44)	2.55	(.43)	2.41	(.37)	4.59	(.54)	4.51	(.55)
		Colère	1.10	(.28)	0.81	(.20)	0.80	(.17)	3.49	(.48)	2.75	(.50)
		Joie	5.28	(.40)	3.80	(.46)	3.28	(.44)	2.32	(.36)	2.44	(.39)
Dégoût	0.20	(.07)	0.23	(.10)	0.10	(.07)	1.60	(.32)	0.83	(.24)		
Groupe "Dégoût"	SAM	Arousal	5.80	(.43)	5.44	(.44)	5.68	(.35)	5.36	(.33)	5.24	(.42)
		Dominance	4.84	(.37)	5.00	(.31)	4.92	(.33)	4.52	(.37)	4.84	(.39)
		Valence	3.48	(.21)	3.72	(.27)	4.48	(.23)	5.60	(.28)	5.76	(.29)
	EVEA	Tristesse	1.92	(.33)	1.72	(.33)	1.22	(.25)	1.39	(.25)	1.26	(.28)
		Anxiété	2.16	(.27)	1.75	(.36)	2.23	(.39)	2.93	(.41)	3.88	(.46)
		Colère	0.85	(.16)	0.68	(.20)	1.08	(.28)	2.06	(.31)	2.26	(.36)
		Joie	5.65	(.35)	4.80	(.45)	3.66	(.48)	3.69	(.39)	3.44	(.43)
Dégoût	0.11	(.05)	0.24	(.21)	0.27	(.21)	3.97	(.53)	1.08	(.40)		

### Test EVEA du groupe "peur"

Nous avons ensuite effectué des t-test pour comparer les résultats des tests EVEA avant les blocs neutres, après l'induction neutre, avec ceux réalisés avant les blocs émotionnels, c'est-à-dire après l'induction de peur (N1 vs. E1). Puis, nous avons comparé les résultats des tests EVEA après les blocs neutres avec ceux des tests EVEA effectués après les blocs émotionnels (N2 vs. E2).

Les résultats sur la tristesse montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus élevés qu'en condition Neutre avant les blocs expérimentaux (N1 vs. E1,  $t(28) = 5.11, p < .001$ ), mais les scores des participants sont similaires en condition Neutre et Émotionnelle après les blocs expérimentaux (N2 vs. E2,  $t(28) = 1.79, p = .084$ ).

Les résultats sur l'anxiété, la colère et le dégoût montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus élevés qu'en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(28) = 4.12, p < .001$  ;  $t(28) = 6.30, p < .001$  ;  $t(28) = 5.00, p < .001$  respectivement pour l'anxiété, la colère et le dégoût, et N2 vs. E2,  $t(28) = 4.79, p < .001$  ;  $t(28) = 4.56, p < .001$  ;  $t(28) = 3.30, p = .003$ ).

Les résultats sur la joie montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus faibles qu'en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(28) = -3.76, p < .001$ , et N2 vs. E2,  $t(28) = -2.74, p = .011$ ).

Les résultats aux tests SAM montrent que les participants du groupe "peur" sont dans un état émotionnel plutôt négatif (valence), se sentent plutôt dominé par leurs émotions, et ayant un arousal plus important qu'en condition Neutre. Ces résultats correspondent aux résultats attendus suite à une induction de Peur (Fernández et al., 2012). De plus, les résultats aux tests EVEA mettent en évidence que l'induction de la peur entraîne une augmentation à court terme de la tristesse, ainsi qu'une augmentation prolongée de l'anxiété, de la colère, du dégoût, et une réduction continue de la joie. Ainsi, en se basant sur le ressenti des participants, l'induction de Peur semble réussie (voir Tableau 5).

#### Test SAM en condition "dégoût"

Les résultats de deux participants ont été retirés des analyses des tests SAM car ceux-ci n'ont pas répondu à chaque fois (2 réponses manquantes pour l'un, et 9 pour l'autre

participant). Nous avons effectué des t-test similaires à ceux réalisés avec les participants du groupe "peur", pour déterminer si l'induction de dégoût avait eu un impact significatif sur l'état émotionnel des participants (voir Tableau 5).

Les résultats sur l'arousal montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont similaires aux scores en condition Neutre avant les blocs expérimentaux (N1 vs. E1,  $t(24) = -0.16$ ,  $p = .874$ ) et après les blocs expérimentaux (N2 vs. E2,  $t(24) = -0.87$ ,  $p = .391$ ).

Les résultats sur la dominance montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont similaires aux scores en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(24) = -1.06$ ,  $p = .302$ , et N2 vs. E2,  $t(24) = -0.20$ ,  $p = .841$ ).

Les résultats sur la valence montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus importants qu'en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(24) = 5.19$ ,  $p < .001$ , et N2 vs. E2,  $t(24) = 3.89$ ,  $p < .001$ ). Or, on sait qu'un score de valence élevé au test SAM signifie que les participants ont un état émotionnel négatif.

#### Test EVEA en condition "dégoût"

A l'instar des analyses faites avec le groupe "peur", nous avons effectué des t-test pour comparer les scores des tests EVEA réalisés avant les blocs neutres, ce qui correspond au moment après l'induction neutre avec ceux recueillis avant les blocs émotionnels, c'est-à-dire après l'induction du dégoût (N1 vs. E1). Puis, nous avons comparé les scores des tests EVEA réalisés après les blocs neutres avec ceux des tests EVEA effectués après les blocs émotionnels (N2 vs. E2).

Les résultats sur la tristesse montrent qu'en condition émotionnelle, les scores des participants ne diffèrent pas significativement aux scores en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(26) = -1.74, p = .094$ , et N2 vs. E2,  $t(26) = 0.30, p = .765$ ).

Les résultats sur l'anxiété, la colère et le dégoût montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus élevés qu'en condition Neutre (N1 vs. E1,  $t(26) = 4.54, p < .001$  ;  $t(26) = 5.14, p < .001$  ;  $t(26) = 7.28, p < .001$  respectivement pour l'anxiété, la colère et le dégoût, et N2 vs. E2,  $t(26) = 4.61, p < .001$  ;  $t(26) = 3.66, p = .001$  ;  $t(26) = 2.75, p = .011$ ).

Les résultats sur la joie montrent qu'en condition Émotionnelle, les scores des participants sont plus faibles qu'en condition Neutre avant les blocs expérimentaux (N1 vs. E1,  $t(26) = -4.18, p < .001$ ), mais les scores des participants sont similaires en condition Neutre et "émotionnelle" après les blocs expérimentaux (N2 vs. E2,  $t(26) = -0.93, p = .362$ ).

Les résultats aux tests SAM montrent que suite à l'induction émotionnelle de dégoût, les participants sont dans un état émotionnel plutôt négatif (valence), mais sans changement significatif de l'arousal ni de la dominance. Ces résultats correspondent aux résultats attendus suite à une induction de Dégoût (Fernández et al., 2012). De plus, les résultats aux tests EVEA mettent en évidence que l'induction de dégoût n'entraîne pas de changement de la tristesse, mais entraîne une augmentation prolongée de l'anxiété, de la colère, du dégoût, ainsi qu'une réduction à court terme de la joie. Ainsi, en se basant sur le ressenti des participants, l'induction de Dégoût semble réussie (voir Tableau 5).

### Analyses des coordonnées Y de la souris

Pour rappel, durant les tâches spatiales et temporelles, le participant devait cliquer sur une barre verticale avec le clic gauche de la souris pour qualifier la durée ou la distance qui séparait les deux points.

### Tâche temporelle

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les coordonnées Y (position du curseur sur l'axe vertical Y, en pixel) pour la tâche temporelle, en fonction du groupe (Peur vs. Dégoût), de l'induction émotionnelle (Neutre vs. Émotionnelle), de la magnitude pertinente (100/225/350/475/600 ms), et de la magnitude non pertinente (3.2°/4.8°).

Les résultats mettent en évidence un effet principal de la magnitude pertinente ( $F(4, 216) = 284.56, p < .001, \eta^2p = .84$ ), signifiant que les participants ont su estimer correctement les durées (voir Tableau 6 et Tableau 7). Il y a aussi un effet principal de la magnitude non pertinente, la distance, ( $F(1, 54) = 65.18, p < .001, \eta^2p = .55$ ), révélant un effet Kappa conséquent. Les résultats montrent également un effet d'interaction significatif entre "magnitude pertinente" et "magnitude non pertinente" ( $F(4, 216) = 10.25, p < .001, \eta^2p = .16$ ), ainsi qu'un effet d'interaction significatif entre "magnitude pertinente", "magnitude non pertinente", et "groupe" ( $F(4, 216) = 2.90, p = .023, \eta^2p = .05$ ). Ces effets d'interaction ne sont pas surprenants, ils suggèrent que l'effet Kappa est plus important pour les magnitudes pertinentes intermédiaires (225/350/475 ms) que pour les magnitudes pertinentes extrêmes (100/600 ms).

Tableau 6

Coordonnées Y et temps de réaction moyens pour le groupe "PEUR" en fonction de l'induction (Neutre vs. Émotionnelle), de la tâche (Temporelle vs. Spatiale), de la magnitude non pertinente, et de la magnitude pertinente.

Induction	Tâche	n	Modalité		Coordonnée Y		Temps de réaction	
			Non-pertinente	Pertinente	Moyenne	(SE)	Moyenne	(SE)
Neutre	Temporelle	(n=29)	3.2°	100ms	318.96	(9.89)	803.72	(50.87)
				225ms	377.67	(11.39)	946.97	(68.60)
				350ms	485.59	(16.41)	958.13	(71.37)
				475ms	627.02	(16.15)	965.67	(65.68)
				600ms	691.15	(15.97)	854.48	(62.80)
			4.8°	100ms	351.79	(16.38)	813.26	(55.39)
				225ms	460.92	(20.33)	1020.08	(78.51)
				350ms	564.53	(16.78)	982.69	(66.52)
				475ms	675.83	(16.85)	963.81	(93.22)
				600ms	709.76	(10.05)	866.78	(59.11)
	Spatiale	(n=29)	100ms	3.2°	358.51	(17.33)	839.66	(62.27)
				3.6°	402.45	(17.50)	871.89	(58.61)
				4°	498.11	(13.80)	917.08	(72.19)
				4.4°	578.09	(18.61)	960.65	(65.09)
				4.8°	679.94	(14.00)	870.51	(69.02)
			600ms	3.2°	441.24	(17.77)	880.91	(71.82)
				3.6°	506.96	(19.96)	919.67	(68.44)
				4°	601.33	(11.91)	927.54	(64.19)
				4.4°	675.02	(14.48)	890.54	(60.95)
				4.8°	718.81	(13.37)	787.88	(48.82)
Peur	Temporelle	(n=29)	3.2°	100ms	326.72	(9.90)	764.49	(55.07)
				225ms	391.58	(16.90)	892.52	(75.74)
				350ms	508.73	(16.37)	862.74	(63.63)
				475ms	616.06	(17.95)	832.86	(49.05)
				600ms	672.28	(19.79)	784.58	(49.40)
			4.8°	100ms	367.87	(15.29)	796.69	(50.33)
				225ms	512.06	(20.83)	918.71	(73.78)
				350ms	601.53	(21.31)	948.37	(75.55)
				475ms	683.46	(16.96)	838.01	(55.93)
				600ms	730.31	(12.87)	820.63	(52.49)
	Spatiale	(n=29)	100ms	3.2°	345.80	(18.12)	812.23	(50.24)
				3.6°	391.18	(17.94)	880.39	(50.31)
				4°	478.78	(19.56)	940.63	(63.73)
				4.4°	581.11	(15.52)	927.01	(56.84)
				4.8°	678.50	(15.88)	908.96	(71.41)
			600ms	3.2°	441.49	(17.55)	894.28	(61.88)
				3.6°	503.31	(15.02)	906.42	(57.57)
				4°	576.93	(16.26)	920.02	(54.40)
				4.4°	654.27	(11.62)	874.67	(48.41)
				4.8°	725.25	(13.97)	849.11	(50.55)

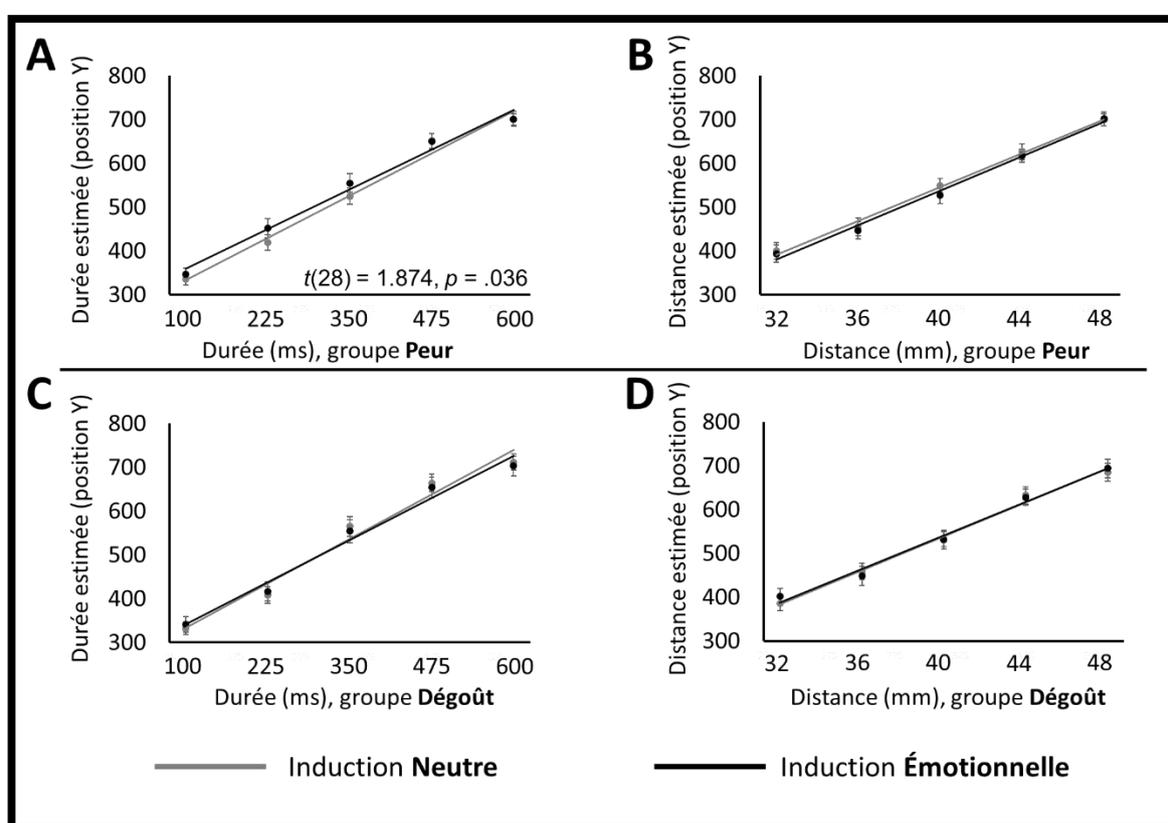
Tableau 7

Coordonnées Y et temps de réaction moyens pour le groupe "DÉGOÛT" en fonction de l'induction (Neutre vs. Émotionnelle), de la tâche (Temporelle vs. Spatiale), de la magnitude non pertinente, et de la magnitude pertinente.

Induction	Tâche	n	Modalité		Coordonnée Y		Temps de réaction				
			Non-pertinente	Pertinente	Moyenne	(SE)	Moyenne	(SE)			
Neutre	Temporelle	(n=27)	3.2°	100ms	321.52	(14.05)	758.18	(57.45)			
				225ms	397.06	(16.74)	753.26	(52.59)			
				350ms	536.49	(22.86)	871.54	(60.92)			
				475ms	652.88	(20.89)	833.92	(59.20)			
				600ms	699.29	(21.11)	811.12	(60.81)			
				4.8°	100ms	343.25	(14.17)	839.88	(59.91)		
			225ms	420.08	(20.52)	874.71	(60.06)				
			350ms	593.38	(20.47)	895.24	(59.08)				
			475ms	675.58	(18.79)	790.59	(60.54)				
			600ms	725.41	(16.14)	815.35	(62.51)				
			Spatiale	(n=27)	100ms	3.2°	358.53	(15.03)	775.67	(52.65)	
						3.6°	408.66	(17.58)	801.90	(50.25)	
	4°	484.42				(20.96)	817.08	(50.59)			
	4.4°	585.59				(16.36)	850.80	(51.71)			
	4.8°	663.87				(21.03)	844.11	(61.88)			
	600ms	3.2°				412.86	(17.24)	873.67	(57.41)		
	3.6°	508.33			(14.29)	843.24	(50.92)				
	4°	577.42			(16.94)	793.48	(50.09)				
	4.4°	679.29			(18.17)	800.50	(53.31)				
	4.8°	707.28			(19.37)	778.88	(52.94)				
	Dégoût	Temporelle			(n=27)	3.2°	100ms	324.28	(15.84)	801.27	(55.74)
							225ms	388.32	(17.15)	800.93	(50.78)
			350ms	503.28			(24.27)	896.86	(57.52)		
			475ms	622.46			(25.80)	836.74	(59.50)		
600ms			686.45	(26.11)			826.13	(52.74)			
4.8°			100ms	358.49			(20.02)	877.63	(69.06)		
225ms			444.79	(24.56)		897.82	(56.98)				
350ms			605.23	(25.40)		858.90	(55.16)				
475ms			685.44	(21.41)		853.39	(54.58)				
600ms			720.02	(18.65)		827.73	(62.03)				
Spatiale			(n=27)	100ms		3.2°	368.68	(16.75)	777.89	(43.33)	
						3.6°	394.45	(17.03)	875.51	(66.07)	
		4°			493.58	(14.05)	849.60	(53.97)			
		4.4°			585.75	(17.50)	915.01	(56.28)			
		4.8°			661.74	(22.03)	872.83	(52.99)			
		600ms			3.2°	435.02	(16.74)	832.58	(55.40)		
		3.6°		502.54	(20.91)	858.75	(57.15)				
		4°		571.19	(16.21)	862.20	(51.72)				
		4.4°		670.22	(15.59)	845.56	(57.45)				
		4.8°		726.95	(19.04)	868.12	(67.60)				

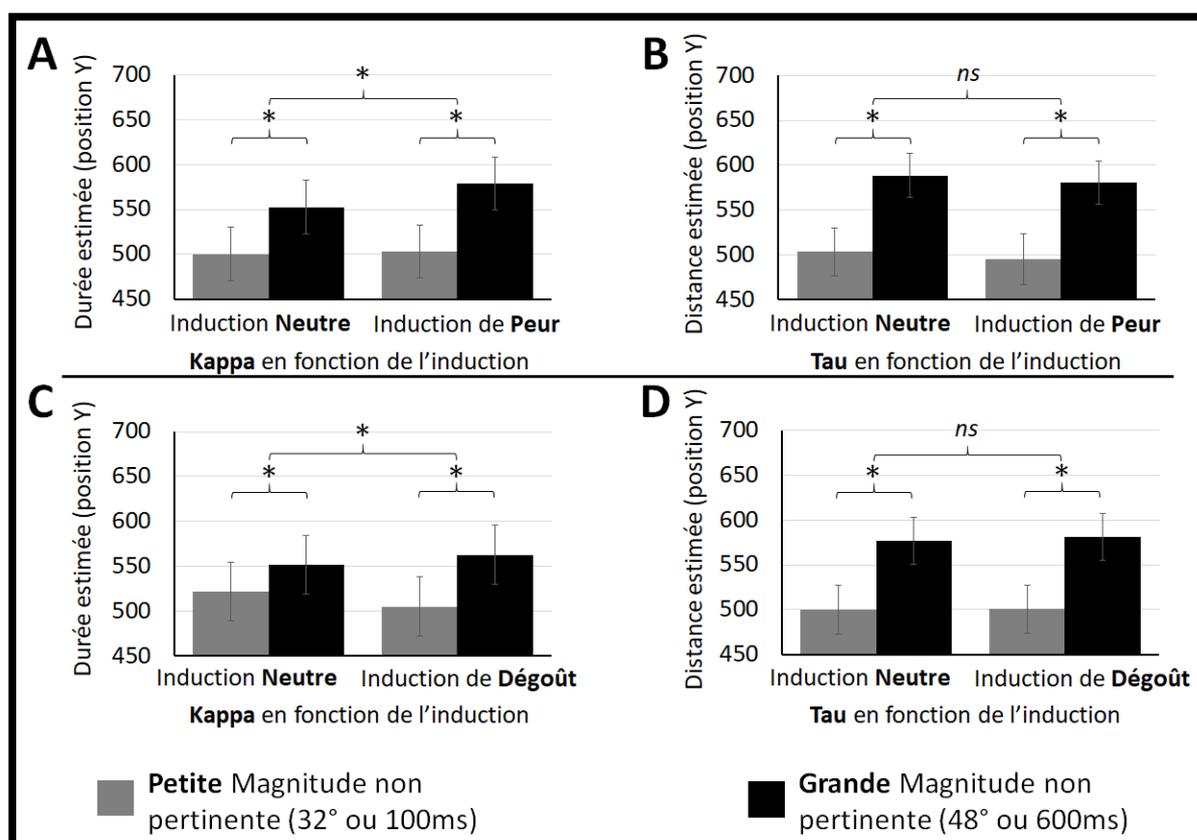
Bien que l'effet d'interaction entre Induction émotionnelle et Groupe ne soit pas significatif ( $F(1, 54) = 2.62, p = .111, \eta^2p = .05$ ), nous avons décidé de réaliser des t-tests d'échantillons appariés avec les coordonnées Y dans la tâche temporelle en fonction de l'Induction et pour chaque Groupe, afin de tester l'effet de la peur et du dégoût sur l'estimation

des durées. Il en ressort un effet de l'induction émotionnelle de peur ( $t(28) = 1.874, p = .036$ ). Ainsi, l'induction de peur provoque une surestimation des durées ( $M = 541.06, SD = 54.07$ ) en comparaison de l'induction neutre ( $M = 526.32, SD = 46.98$ ). Cela concorde avec les effets fréquemment observés dans la littérature, des émotions négatives à fort arousal sur les estimations des durées (voir Figure 35). Concernant le dégoût, l'effet de l'induction émotionnelle sur l'estimation des durées n'est pas significatif ( $t(26) = -0.363, p = .720$ ). Cela coïncide aussi avec l'absence, fréquemment observée dans la littérature, d'effet des émotions négatives à faible arousal sur les estimations des durées.



**Figure 35.** Estimations moyennes (en pixels) des durées et des distances, en fonction de la tâche, du groupe et de l'induction. (A) Durée estimée dans la tâche temporelle pour le groupe Peur. (B) Distance estimée dans la tâche spatiale pour le groupe Peur. (C) Durée estimée dans la tâche temporelle pour le groupe Dégoût. (D) Distance estimée dans la tâche spatiale pour le groupe Dégoût.

Les résultats de l'ANOVA suggèrent également un effet d'interaction entre Magnitude non pertinente et Induction émotionnelle ( $F(1, 54) = 4.36, p = .041, \eta^2p = .08$ ), reflétant une augmentation de l'effet Kappa en condition Émotionnelle comparé au bloc neutre (voir Figure 36). De plus, cette augmentation d'effet Kappa en condition Émotionnelle ne diffère pas selon l'émotion induite ("magnitude non pertinente", "Induction émotionnelle" et "groupe" :  $F(1, 54) = 0.03, p = .863, \eta^2p < .01$ ).



**Figure 36.** Estimations moyennes (en pixels) des durées et des distances, en fonction de la magnitude non pertinente, de la tâche, du groupe et de l'induction. Plus l'écart entre la "Petite magnitude non pertinente" et la "Grande magnitude non pertinente" est important, plus l'effet d'interférence est important. (A) Durée estimée dans la tâche temporelle pour le groupe Peur en fonction de la distance (effet Kappa) et de l'induction. (B) Distance estimée dans la tâche spatiale pour le groupe Peur en fonction de la durée (effet Tau) et de l'induction. (C) Durée estimée dans la tâche temporelle pour le groupe Dégoût en fonction de la distance (effet Kappa) et de l'induction. (D) Distance estimée dans la tâche spatiale pour le groupe Dégoût en fonction de la durée (effet Tau) et de l'induction.

### Tâche spatiale

Nous avons par la suite effectué une ANOVA à mesures répétées sur les coordonnées Y pour la tâche spatiale, en fonction du groupe (Peur vs. Dégoût), de l'induction émotionnelle (Neutre vs. Émotionnelle), de la magnitude pertinente (3.2/3.6/4.0/4.4/4.8°), et de la magnitude non pertinente (100/600 ms).

A l'image des résultats de la tâche temporelle, nous retrouvons un effet principal de la magnitude pertinente ( $F(4, 216) = 229.73, p < .001, \eta^2p = .81$ ), signifiant que les participants ont su estimer correctement les distances. Il y a également un effet principal de la magnitude non pertinente ( $F(1, 54) = 72.85, p < .001, \eta^2p = .57$ ), démontrant qu'il y a un effet Tau. Les résultats montrent par ailleurs un effet d'interaction significatif entre Magnitude pertinente et Magnitude non pertinente ( $F(4, 216) = 7.42, p < .001, \eta^2p = .12$ ), montrant que l'effet Tau est plus importants pour les magnitudes pertinentes intermédiaires (3.6/4.0/4.4°) que pour les magnitudes pertinentes extrêmes (3.2/4.8°).

Dans la continuité des analyses précédentes en tâche temporelle et bien que l'effet d'interaction entre Induction émotionnelle et Groupe ne soit pas significatif ( $F(1, 54) = 1.00, p = .323, \eta^2p = .02$ ), nous avons effectué des t-tests d'échantillons appariés avec les coordonnées Y dans la tâche spatiale en fonction de l' Induction et pour chaque Groupe, afin de tester l'effet de la peur et du dégoût sur l'estimation des distances. Il n'en ressort pas d'effet significatif, pour le groupe Peur ( $t(28) = -1.168, p = .874$ ) ni pour le groupe Dégoût ( $t(26) = .294, p = .771$ ). Ainsi, ni la peur ni le dégoût ne semblent influencer les estimations de distances.

Par ailleurs, l'ANOVA révèle également que l'effet d'interaction entre Magnitude non pertinente et Induction émotionnelle n'est pas significatif non plus

( $F(1, 54) = .07, p = .796, \eta^2p < .01$ ). Cela suggère que l'effet Tau ne semble pas changer en puissance selon l'induction émotionnelle, contrairement à l'effet Kappa.

En adéquation avec la littérature, nos résultats montrent que l'induction de peur, émotion à valence négative avec un fort arousal, entraîne une surestimation des durées, mais pas d'altération des estimations spatiales. L'induction de dégoût, émotion à valence négative avec un faible arousal, ne provoque pas d'altération des estimations spatiales et temporelles. Cependant, ces deux inductions émotionnelles semblent provoquer une augmentation de l'effet Kappa, mais n'ont pas d'impact sur l'effet Tau.

#### Analyses des temps de réaction

Nous avons par la suite effectué une ANOVA à mesures répétées sur les temps de réaction pour le groupe Peur, en fonction de la tâche (spatiale vs. temporelle), de l'occurrence de la tâche (première passation de la tâche vs. deuxième passation de la tâche) de l'ordre d'induction (neutre puis émotionnelle vs. émotionnelle puis neutre), de la magnitude pertinente (5 modalités, 3,2/3,6/4/4,4/4,8° en tâche spatiale, et 100/225/350/475/600 ms en tâche temporelle) et de la magnitude non pertinente (5 modalités, 100/225/350/475/600 ms en tâche spatiale, et 3,2/3,6/4/4,4/4,8° en tâche temporelle). L'objectif était de tester le potentiel effet de l'émotion sur les temps de réaction. Cependant, les résultats de l'ANOVA montrent un effet principal de l'occurrence de la tâche ( $F(1, 27) = 66.47, p < .001, \eta^2p = .71$ ), qui suggère que les participants étaient plus rapides lors de la deuxième passation des tâches temporelles et spatiales, que lors de la première passation. Les résultats ne montrent pas d'effet d'interaction entre Occurrence de la tâche et Ordre d'induction ( $F(1, 27) = 1.66, p = .209, \eta^2p = .06$ ), ce qui aurait pu être interprété comme un effet de l'émotion sur les temps de réaction. De plus, il y a une absence d'effet principal de la tâche ( $F(1, 27) < .01, p = .990, \eta^2p < .01$ ), ce qui laisse penser que les deux tâches requièrent une demande cognitive équivalente.

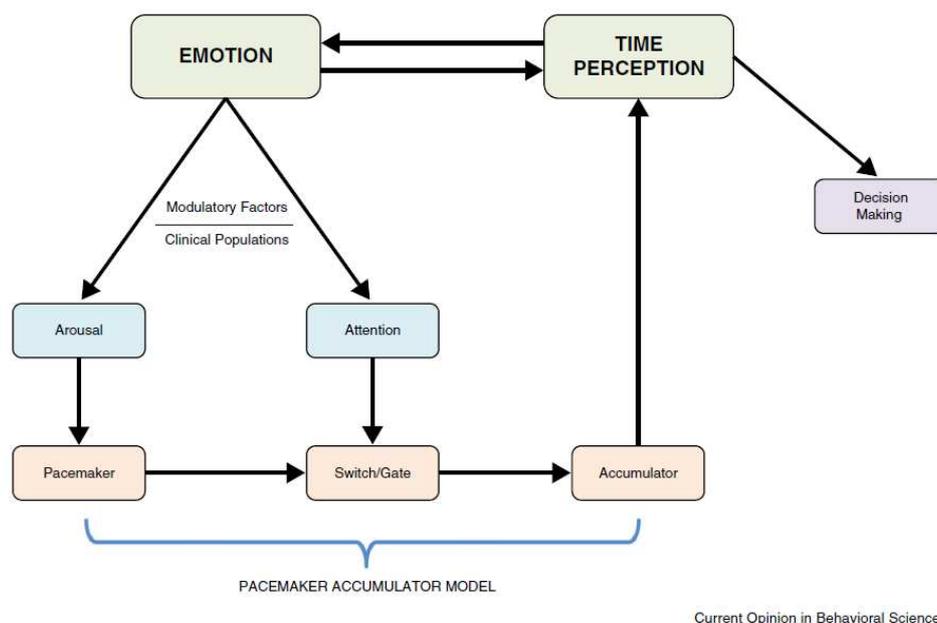
Enfin, pour tester cette même hypothèse avec le groupe Dégout, nous avons effectué une ANOVA similaire à la précédente. Les résultats sont très semblables à ceux obtenus avec l'induction de Peur, il y a un effet principal de l'occurrence de la tâche ( $F(1, 25) = 14.44, p < .001, \eta^2p = .37$ ), révélant que les participants étaient plus rapides lors de leur deuxième passation des tâches spatiales et temporelles. Nous n'observons pas d'effet d'interaction entre Occurrence de la tâche et Ordre d'induction ( $F(1, 27) = 1.94, p = .176, \eta^2p = .07$ ), ce qui aurait pu être interprété comme un effet de l'émotion sur les temps de réaction. Enfin, il y a une absence d'effet principal de la tâche ( $F(1, 25) = .05, p = .833, \eta^2p < .01$ ), ce qui laisse penser que les deux tâches requièrent une demande cognitive équivalente.

## Conclusion

Les analyses statistiques réalisées avec le SAM et l'EVEA nous confortent dans l'idée que les inductions émotionnelles ont correctement fonctionné. L'induction de peur provoquait une sensation d'éveil forte (fort arousal), une sensation de dominance faible, une sensation d'un état émotionnel négatif (valence négative), une augmentation (temporaire) de la tristesse, une augmentation de l'anxiété, de la colère, du dégoût, et une réduction de la sensation de joie. Ces résultats concordent avec l'idée que l'émotion de peur est une émotion négative à fort arousal. L'induction de dégoût provoquait quant à elle une sensation d'éveil (arousal) et de dominance équivalente à celle en condition Neutre, mais elle provoquait un état émotionnel négatif (valence négative), une augmentation de l'anxiété, de la colère, du dégoût, une réduction (temporaire) de la joie, et aucun changement de la tristesse. Ces résultats concordent avec l'idée que l'émotion de dégoût est une émotion à valence négative à faible arousal.

Les analyses sur les coordonnées Y de la souris au moment de la réponse montrent que les participants ont correctement évalué les durées et les distances, et ont été interférés par les

effets Tau et Kappa. Concernant l'effet des inductions émotionnelles, pour la tâche temporelle, seule l'induction de peur (valence négative à fort arousal) a provoqué une surestimation des durées, ce qui est en accord avec la littérature. La relation entre la perception du temps et les émotions est maintenant très documentée. En se basant sur le modèle de l'horloge interne (voir chapitre introductif 1, et voir : Gibbon et al., 1984 ; Gibbon, 1977), l'impact des émotions sur nos estimations temporelles aurait lieu directement sur le pacemaker et l'interrupteur (voir Figure 37). Les émotions négatives provoqueraient une fermeture plus rapide de l'interrupteur et une réouverture plus lente, augmentant donc la durée pendant laquelle les signaux passent jusqu'à l'accumulateur et par conséquent le nombre de signaux stockés, débouchant sur une très légère surestimation temporelle. Les émotions à fort arousal quant à elles auraient un impact directement sur le pacemaker, en augmentant son rythme. Le pacemaker ayant une fréquence plus importante, enverrait donc plus de signaux durant le laps de temps où l'interrupteur est fermé, ce qui là aussi découlerait sur un nombre plus important de signaux envoyés et donc stockés par l'accumulateur, provoquant une surestimation du temps (Dirnberger, Hesselmann, Roiser, Preminger & Jahanshahi, 2012 ; Gil & Droit-Volet, 2011, 2012 ; Lake, 2016 ; Lake & Meck, 2013 ; Lui, Penney & Schirmer, 2011 ; Mogg & Bradley, 1999 ; Ohman, Flykt & Esteves, 2001 ; Treisman, 1963).



**Figure 37.** Représentation schématique du fonctionnement des effets de l'émotion sur nos estimations temporelles, dans le cadre du modèle de l'horloge interne (Lake, 2016)

En revanche, pour la tâche spatiale aucun effet des inductions émotionnelles n'a été observé. Bien que cela coïncide là aussi avec les constatations habituelles dans la littérature, nos résultats ne répliquent pas les résultats obtenus par Droit-Volet en 2013, malgré l'utilisation de distances séquentielles. Notez néanmoins que notre paradigme peut présenter une faille sur cet aspect-là : bien que les distances étaient séquentielles dans nos expériences, elles n'étaient pas progressives. Les participants ne devaient pas "additionner" plusieurs petits morceaux de distances jusqu'à arriver à la distance totale comme on le fait avec les durées. Les participants devaient accumuler les informations pendant leurs estimations spatiales, mais ils n'avaient connaissance de la distance totale qu'à l'apparition du deuxième point. Il n'y avait donc pas de processus continu d'accumulation en vue de l'estimation. L'intérêt d'employer ce type de stimuli spatiaux est d'éviter les potentiels effets dus à la vitesse de progression de la distance ou du mouvement du stimulus. A savoir que l'effet de la vitesse produit une sorte d'effet Tau inverse (petite durée = surestimation de l'espace), que nous souhaitons éviter puisqu'il

entrerait en concurrence avec l'effet Tau (Henry & McAuley, 2009 ; Henry, MacAuley & Zaleha, 2009 ; Reali, Lleras & Alviar, 2019).

Vis-à-vis de l'impact des émotions sur les effets d'interférence Tau et Kappa, les analyses ont montré que l'effet Kappa était plus important en condition Émotionnelle qu'en condition Neutre. Ce constat semble peu étonnant puisque la perturbation des processus liés aux estimations temporelles par les émotions négatives à fort arousal est un phénomène bien connu et très documenté (Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011 ; Tipples, 2008). Néanmoins, cet impact de l'émotion sur l'effet Kappa est présent pour les deux types d'induction ; que les participants soient assignés à la condition "induction de peur" ou à la condition "induction de dégoût". Ce constat est intéressant dans le sens où les participants sous induction de dégoût n'ont pas rapporté de surestimation des durées. L'augmentation de l'effet Kappa suite à cette induction aurait donc eu lieu malgré une absence de perturbation des estimations temporelles. Il se peut que les estimations temporelles en contexte de dégoût aient été perturbées, mais pas de façon tangible. Notre protocole n'aurait pas permis de mesurer ce phénomène. Si tel était le cas, alors la modulation de l'effet Kappa pourrait être causée par la fragilité des estimations temporelles en contexte émotionnel. En revanche, l'effet Tau, lui, semble ne pas avoir été impacté par les inductions émotionnelles. Ce constat pourrait s'expliquer par l'absence de perturbation des estimations spatiales sous induction émotionnelle. Reste à comprendre pourquoi ces inductions émotionnelles auraient perturber les estimations temporelles mais pas spatiales. Cet effet différentiel des émotions sur le temps et l'espace n'est pas en faveur d'un système commun de traitement des magnitudes.

Les résultats de l'analyse sur les temps de réaction montrent que, indépendamment du type d'induction, les tâches spatiales et temporelles requéraient des demandes en ressources cognitives équivalentes, et qu'il n'y avait pas d'impact des inductions émotionnelles sur les temps de réaction des participants. Ces résultats amènent à penser que la surestimation des

durées et l'augmentation de l'effet Kappa ne sont pas consécutives d'une variation du coût cognitif de la tâche.

## Discussion

La recherche sur le lien entre les émotions et les magnitudes fait globalement consensus, sous l'influence d'émotions négatives à fort arousal, le temps perçu est surestimé, la numérosité est sous-estimée, et les estimations spatiales ne sont pas affectées. Ce constat est cependant problématique au regard des idées avancées dans le cadre de la théorie AToM (Buetti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003) selon laquelle les estimations des différentes magnitudes sont traitées et gérées par un seul et même système de traitement commun et équitable des magnitudes. Néanmoins, une étude réalisée par Droit-Volet en 2013 laisse penser que l'utilisation de stimuli séquentiels permettrait de faire ressortir un effet des émotions sur les distances similaire à celui observé sur les durées (surestimation en présence d'émotion à valence négative et à fort arousal).

Cependant, les résultats de notre étude s'accordent plus avec le consensus de la littérature (surestimation du temps, mais pas d'effet sur l'espace) qu'avec les résultats obtenus par Droit-Volet en 2013. Notez que notre expérience ne permet en revanche pas de contredire les conclusions de l'étude de Droit-Volet (2013) puisque les distances employées étaient séquentielles mais non progressives, et que notre expérience ne contenait pas de tâche d'estimation de numérosité.

Les résultats de l'étude sur l'effet Kappa montrent que les émotions négatives augmentent la force de cet effet. Ainsi, les durées sont sous-estimées en présence de la distance courte, les durées sont surestimées en présence de la distance longue, et ce phénomène est d'autant plus important sous l'effet d'une induction émotionnelle négative. Par ailleurs, il semblerait que cette augmentation de l'effet Kappa ait lieu à la fois sous l'induction de peur,

mais aussi sous l'induction de dégoût. Ce phénomène peut sembler surprenant puisque les estimations temporelles des participants n'ont pas été tangiblement perturbées par l'émotion de dégoût.

L'interprétation théorique des résultats obtenus sur l'effet Kappa est très hypothétique puisque cette étude est la première, à notre connaissance, à étudier l'impact des émotions sur les effets d'interférence. Au regard du modèle de l'horloge interne (Gibbon et al., 1984 ; Gibbon, 1977), les émotions négatives permettent une fermeture précoce de l'interrupteur, laissant passer l'information plus tôt, et une réouverture tardive, laissant donc passer l'information pendant plus longtemps (Lake, 2016). Or, puisque les participants n'ont connaissance de la distance qu'à la fin de l'essai (lors de l'affichage du deuxième point), nous pensons que la réouverture tardive de l'interrupteur due à une émotion négative favorise le passage des informations spatiales dans l'accumulateur. Il se pourrait également que la fermeture et la réouverture de l'interrupteur soient en réalité des signaux, potentiellement porteurs d'informations ou de traces. Se faisant, la réouverture de l'interrupteur pourrait transporter avec elle des informations spatiales, qui entreraient donc ensuite dans le processus du traitement de la durée. L'amplification de l'effet Kappa sous l'induction de dégoût pourrait donc s'expliquer par le fait qu'une émotion négative, qu'elle soit à faible ou à fort arousal, puisse impacter notre attention, et que l'interrupteur soit spécifiquement géré par l'attention. Ainsi, nous ne sommes pas encore en mesure de déterminer avec certitude à quelle étape l'effet Kappa interviendrait durant le processus d'estimation temporelle. Néanmoins, nous partons du postulat que, compte tenu de sa robustesse, cet effet interviendrait durant une phase antérieure au passage des informations temporelles dans l'accumulateur.

De plus, nous savons que l'accumulateur serait un mécanisme géré par la mémoire de travail (Gibbon et al., 1984 ; Gibbon, 1977). Or, les émotions semblent ne pas impacter les processus au sein de la mémoire de travail. Des études ont montré que l'émotion pouvait

engendrer une amélioration des performances en mémoire de travail (Edelstein, 2006 ; Mammarella et al., 2013), mais le constat inverse est également parfois rapporté (Fairfield et al., 2015 ; Joormann et al., 2011 ; Schweizer & Dalgleish, 2016). Globalement, ces effets semblent peu robustes (Kensinger & Corkin, 2003), et les chercheurs s'accordent sur le fait que l'impact de l'émotion sur la mémoire de travail proviendrait du passage des informations émotionnelles dans les processus attentionnels. Ainsi, il n'y aurait pas d'effet de l'émotion au sein même de la mémoire de travail. Les informations émotionnelles qui arrivent en mémoire de travail seraient d'ailleurs traitées dans un système dédié et spécifique aux émotions au sein de la mémoire de travail (Mikels, Reuter-Lorenz, Beyer & Fredrickson, 2008). Ce constat corrobore l'absence d'effet de l'émotion sur l'accumulateur, suggéré par la littérature (voir Figure 37 ; Lake, 2016). Ces études renforcent donc l'idée selon laquelle l'impact des émotions sur les estimations temporelles auraient lieu avant la phase d'accumulation. Il est par conséquent possible d'imaginer que l'impact des émotions sur l'effet Kappa ait également lieu avant la phase d'accumulation des informations temporelles en mémoire de travail.

Les résultats de l'étude sur l'effet Tau mettent en évidence que Tau n'est pas significativement impacté par l'induction émotionnelle. L'absence de perturbation des estimations spatiales en condition émotionnelle pourrait expliquer ce résultat. Néanmoins, il serait intéressant de faire le parallèle avec l'effet Kappa, qui lui, a été modulé par l'émotion de dégoût, alors même que les estimations temporelles n'étaient pas surestimées sous cette induction. Et si l'absence d'effet Tau n'était pas liée à l'imperméabilité du traitement de l'espace vis-à-vis des émotions ? Puisque l'effet Tau semble fortement dépendre des ressources cognitives engagées, il devrait partager de forts liens avec les processus de mémoire de travail. Au regard de nos hypothèses précédentes, il devrait donc probablement émerger durant le processus de maintien en mémoire de travail de l'information spatiale. Or, les chercheurs étudiant les différents effets de l'émotion sur la mémoire de travail s'accordent à dire que ces

effets n'émergeraient pas au sein même du traitement des informations en mémoire de travail (Edelstein, 2006 ; Fairfield et al., 2015 ; Joormann et al., 2011 ; Kensinger & Corkin, 2003 ; Mammarella et al., 2013 ; Mikels, Reuter-Lorenz, Beyer & Fredrickson, 2008 ; Schweizer & Dalgleish, 2016). Par conséquent, que Tau ne soit pas impacté par les émotions négatives pourrait s'expliquer par le fait qu'il émergerait spécifiquement durant le traitement des informations spatiales au sein de la mémoire de travail. Cette interprétation théorique demeure néanmoins très spéculative puisque la littérature rapportant et décrivant un effet de l'émotion sur l'estimation spatiale n'est que très peu documentée (Droit-Volet, 2013). De plus, cette étude est, à notre connaissance, la première tentant d'observer l'impact de l'émotion sur l'effet Tau. Par ailleurs, l'absence de perturbation des estimations spatiales ne permet pas d'affirmer que l'absence d'effet Tau serait bel et bien liée au fait qu'il émergerait durant la phase de réactualisation des informations spatiales en mémoire de travail.

Nos résultats nous encouragent à soutenir l'hypothèse selon laquelle l'effet Kappa pourrait émerger avant le processus d'accumulation des informations temporelles en mémoire de travail. Pour l'effet Tau en revanche, nos résultats ne nous permettent pas de trancher, mais nous laissent continuer de penser que l'effet Tau émergerait durant la phase du traitement de l'espace en mémoire de travail. Cette étude nous conforte donc dans notre hypothèse selon laquelle Tau et Kappa émergeraient à des étapes différentes dans le processus d'estimation.

Au final, cette étude présente des résultats remettant en question les théories du SCTM. Premièrement, elle semble aller dans le sens de la littérature sur le sujet, en répliquant la distorsion des estimations temporelles par les émotions. Et deuxièmement, elle souligne que l'impact des émotions sur les effets d'interférence espace-temps est spécifique. L'effet Tau n'est pas impacté, alors que l'effet Kappa est amplifié suite à une induction émotionnelle négative. Bien que l'interprétation que l'on puisse en faire soit très spéculative, ce constat nous conforte dans l'idée que l'émergence de l'effet Kappa pourrait être antérieure à l'accumulation

des informations temporelles au sein de la mémoire de travail. Le fait que ces effets d'interférence ne soient pas impactés de la même manière et qu'ils puissent émerger à des moments différents lors du processus d'estimation (avec un effet Kappa apparaissant avant l'effet Tau) pourrait s'avérer être un argument de poids pour réfuter que les effets d'interférence seraient issus d'un SCTM, sans pour autant réfuter l'existence de ce système.

# Discussion générale

## Rappel du cadre théorique

A ce jour, plusieurs courants théoriques font débat dans la littérature sur la façon dont le système cognitif traite les magnitudes. D'un côté, il est envisagé que le traitement des magnitudes serait géré par un système commun à toutes les magnitudes, permettant d'effectuer des estimations et de manipuler des quantités. Cette première théorie basée sur l'existence d'un système commun est la théorie AToM (*A Theory of Magnitude*), proposée par Walsh en 2003. Elle s'appuie sur l'observation systématique de signatures comportementales communes pour les grandeurs spatiales, temporelles et numériques (tels que l'effet de distance, ou l'effet de taille). Parallèlement, un autre argument pour la théorie AToM provient du constat selon lequel le traitement des différentes magnitudes suit une même trajectoire développementale. Dans les premières années de vie, les enfants gagnent indéniablement en précision dans l'estimation et la manipulation des magnitudes, et cette progression est similaire pour les caractéristiques spatiales, temporelles et numériques. Des évidences neuroscientifiques permettent également d'étayer cette théorie AToM. En effet, le traitement des grandeurs spatiales, temporelles et numériques semble entraîner des activations dans le sillon intrapariétal. De même, les activations dans ces régions cérébrales corréler avec les signatures comportementales telles que l'effet de distance ou l'effet de taille susmentionnés. D'ailleurs cette région cérébrale serait directement impliquée dans les effets d'interférence, notamment ceux entre numérosité et temps (voir Hayashi et al., 2013). La théorie AToM suggère donc que le traitement et l'estimation des magnitudes serait géré par un système commun aux magnitudes dans le but de contrôler et superviser l'action (voir Figure 6). Selon cette théorie, il n'y aurait pas de hiérarchie particulière entre les différentes dimensions au sein du système. Une des principales

conséquences de ce système unique concerne les effets d'interférence entre les magnitudes, qui seraient, par extension de ce modèle, réciproques et symétriques. Le traitement des magnitudes pertinentes pour réaliser une tâche (i.e. durée dans une tâche d'estimation temporelle) est contaminé par le traitement de magnitudes non pertinentes (i.e. distance ou numérosité). La **réciprocité** exprimée dans la théorie AToM prédit qu'une magnitude A, bien que non-pertinente, peut influencer l'estimation de la magnitude B (pertinente pour la tâche), mais cette théorie prédit également que dans une tâche où la magnitude B serait devenue non pertinente, celle-ci pourra tout de même, en retour, influencer l'estimation de la magnitude A. De plus, la notion d'interférences **symétriques** stipule que l'effet de la magnitude A sur la magnitude B est supposé être d'ampleur équivalente à l'effet de la magnitude B sur la magnitude A. Les magnitudes seraient positivement corrélées puisque plus la dimension à ignorer est grande, plus la surestimation est prononcée.

Le second courant théorique, qui s'oppose à la théorie AToM, suggère que le SCTM serait hiérarchisé. Les capacités d'estimation des magnitudes seraient héritées du développement phylogénétique (et ontogénétique) d'un système dédié au traitement d'une dimension continue, ayant trait aux caractéristiques spatiales. Dans ce courant qui défend l'idée que l'espace joue un rôle majeur, la théorie de la métaphore conceptuelle (CMT : voir Figure 7) se distingue des autres courants pour son argumentaire autour des effets d'interférence entre magnitudes. Issue de la psycholinguistique, elle attribue à l'espace un rôle prépondérant dans le fonctionnement du système commun du traitement des magnitudes (Alverson, 1994 ; Boroditsky & Gaby, 2010 ; Clark, 1973 ; Evans, 2004 ; Haspelmath, 1997 ; Lakoff & Johnson, 1980, 1999 ; Lakoff & Núñez, 2000 ; Traugott, 1978). Cette théorie suggère que les effets d'interférence entre les magnitudes seraient la signature d'un système commun du traitement des magnitudes dans lequel l'espace devrait influencer les estimations des autres magnitudes de manière très prononcée, et donc asymétrique. L'influence de l'espace sur nos estimations

temporelles et numériques seraient bien plus importantes que l'influence du temps ou de la numérosité sur l'espace. L'absence récurrente d'effet Tau dans la littérature est d'ailleurs l'argument principal avancé par les auteurs pour défendre cette théorie.

Il faut concéder que les résultats de la littérature vont dans le sens d'effets d'interférence asymétriques entre les magnitudes (voir Figure 16). Les études sur les effets espace-numérosité mettent en évidence une supériorité de l'espace sur la numérosité (Dormal & Pesenti, 2007 ; Hurewitz, Gelman & Schnitzer, 2006). Quant aux études sur les effets temps-numérosité, les moins étudiées, elles semblent montrer l'existence d'un effet de la numérosité sur le temps (Dormal, Seron & Pesenti, 2006 ; Droit-Volet, Clément, & Fayol, 2003). Cependant, les rares fois où le temps semble influencer l'estimation de numérosité, l'effet relaté est une corrélation négative entre temps et numérosité. Plus la durée est courte, plus la numérosité est surestimée (Lambrechts, Walsh & van Wassenhove, 2013 ; Martin, Wiener, & van Wassenhove, 2017). L'asymétrie des effets d'interférence espace-temps est sans aucun doute la plus étudiée et la plus étayée. L'effet Kappa (de l'espace sur nos estimations temporelles) semble être un effet robuste, systématiquement répliqué. A l'inverse, les rares fois où l'effet Tau (du temps sur nos estimations spatiales) est mis en évidence, il est d'importance moindre en comparaison de l'effet Kappa (Bottini & Casasanto, 2013 ; Casasanto & Boroditsky, 2008 ; Casasanto, Fotakopoulou, & Boroditsky, 2010 ; Merritt et al., 2010).

Nonobstant, l'émergence de l'effet Tau semble exiger le respect de certaines conditions. Il est important que les stimuli employés dans les tâches d'estimations spatiales soient séquentiels (Coull, Charras, Donadieu, Droit-Volet & Vidal, 2015 ; Coull & Droit-Volet, 2018). En effet, l'estimation temporelle est par nature séquentielle. Un processus d'estimation doit être volontairement enclenché quand la durée commence, puis il demande une accumulation active l'information jusqu'à ce que la durée à estimer se termine. Sur la base de cette accumulation d'informations temporelles, une décision sera prise sur la durée perçue de

l'événement, une réponse motrice pourra alors être promulguée. Or, l'écrasante majorité des paradigmes ayant pour but d'étudier les effets d'interférence espace-temps utilisent des stimuli statiques dans la tâche spatiale. En d'autres termes, ce sont des stimuli dont les caractéristiques spatiales sont mises à disposition simultanément, telle une ligne flashée sur un écran d'ordinateur dont la longueur est manipulée. Le traitement des caractéristiques spatiales, quand les stimuli sont statiques, n'engendrent pas de processus d'accumulation, et ne demandent pas non plus de mobiliser des ressources en mémoire de travail. Il est donc normal que la durée du stimulus ne puisse pas influencer notre estimation de la distance/longueur/taille du stimulus puisque cette dernière s'effectue avant même que nous puissions obtenir l'information temporelle.

Le fait que l'effet Tau puisse émerger si les stimuli utilisés sont séquentiels questionne l'asymétrie entre les effets d'interférence espace-temps. De récentes recherches ont souligné que l'effet Tau était probablement lié à la charge cognitive ou aux ressources en mémoire de travail. Nous avons donc émis l'hypothèse qu'il fallait prêter attention aux temps de réaction des participants en plus de leur précision (ratios de Weber) dans le but d'équilibrer la tâche spatiale et la tâche temporelle (Brus, Heng & Polania, 2019 ; Link, 1992 ; Pardo-Vasquez et al., 2019 ; Simen, Vlasov & Papadakis, 2016). Cet objectif d'équilibrer les deux tâches peut s'effectuer en manipulant la demande en ressources cognitives des deux tâches lors de l'élaboration de l'expérience.

Un autre phénomène nous a amené à nous interroger sur l'existence, hypothétique, d'un système commun aux magnitudes : la relation entre les émotions et les différentes magnitudes. En effet, l'impact des émotions diffère selon la magnitude étudiée. Par exemple, la littérature montre que les émotions négatives à fort arousal provoquent une surestimation des durées (Droit-Volet, Brunot & Niedenthal, 2004 ; Gil & Droit-Volet, 2011) mais des effets différentiels pour les autres magnitudes. Les études font état d'une sous-estimation de la

numérosité dans un contexte aversif (négatif à fort arousal), alors que les jugements basés sur des caractéristiques spatiales resteraient imperméables à ce contexte (Baker et al., 2013 ; Hamamouche et al., 2017 ; Lui, Penney & Schirmer, 2011 ; Tipples, 2008 ; Young-Cordes, 2013). Ce constat est difficilement compatible, nous semble-t-il, avec les hypothèses de la théorie AToM puisqu'au regard de ses prédictions les émotions devraient impacter les magnitudes de manière semblable. Nous nous sommes interrogés dans ce travail sur l'effet des émotions sur la perception du temps et de l'espace, et plus particulièrement, nous avons investigué l'impact d'un contexte émotionnel sur les interférences espace-temps. Il est à noter qu'aucune étude à notre connaissance ne s'est intéressée à l'impact que pouvaient avoir les émotions négatives sur ces effets d'interférence.

## **Résumés des chapitres expérimentaux**

L'objectif de cette thèse était d'enquêter sur la nature des effets d'interférence espace-temps, ainsi que sur leur rôle potentiel au sein du SCTM. Nous nous demandions s'il était possible d'engendrer un effet Tau supérieur à l'effet Kappa en contrôlant la demande en ressources cognitives des tâches spatiales et temporelles. La supériorité de Tau sur Kappa a été investiguée dans un protocole expérimental inter mais également intra-sujets pour tester la robustesse de cet effet. Nous avons ensuite cherché à répliquer la supériorité de Tau sur Kappa dans des expériences qui nous ont permis de contrôler un grand nombre de paramètres susceptibles de biaiser l'interprétation des résultats. Aussi, pour "décortiquer" au mieux ces deux phénomènes, nous avons testé si la performance des participants dans des tâches temporelles et spatiales pouvait prédire la force des effets Tau et Kappa, en explorant les différences interindividuelles. L'ensemble des résultats de ces séries expérimentales nous ont servi de premiers arguments pour formuler l'hypothèse que les émotions auraient un impact différent sur les effets Tau et Kappa. Nous avons décidé de mener une dernière étude afin de

tester cette hypothèse. L'objectif final de nos recherches était de pouvoir émettre des hypothèses/propositions théoriques sur l'origine des effets d'interférence espace-temps. Les différents travaux dans la littérature, associés aux résultats des expériences des chapitres 4 et 5, nous ont laissé penser que les effets Tau et Kappa pouvaient être de nature différente. En outre, nous voulions tester l'hypothèse selon laquelle les effets Tau et Kappa émergeraient à des moments différents durant le processus d'estimation. Si tel est le cas, alors il semble peu judicieux de considérer que ces effets d'interférence résulteraient chacun du SCTM. Par conséquent, il semblerait délicat de s'appuyer sur l'existence de ces signatures comportementales pour justifier ou invalider un des modèles théoriques.

### ***Relativité des effets d'interférence espace-temps***

Dans une première étude, "*Reproduction de l'asymétrie Kappa > Tau*", nous avons testé le rôle de la demande en ressources cognitives des tâches dans l'apparition d'un effet Tau de force comparable à l'effet Kappa. La première expérience avait pour but de répliquer les résultats obtenus dans la littérature. Les participants devaient estimer des durées et des distances au travers de deux tâches de bissection. Pour chaque tâche, un essai était constitué d'un point apparaissant à un endroit sur un écran pendant 300 ms, suivie d'un autre point apparaissant pendant 300 ms à un endroit différent. La durée qui s'écoulait entre les deux points, et la distance qui séparait les deux points variaient (voir Figure 23). Dans la tâche temporelle les participants devaient estimer la durée (100, 225, 350, 475 ou 600 ms) en la catégorisant de "courte" ou de "longue" (en se référant aux durées extrêmes, 100 et 600 ms), et ignorer la distance entre les points (1.6 et 12.8°). Dans la tâche spatiale, ils devaient cette fois-ci estimer la distance (1.6, 4.4, 7.2, 10 ou 12.8°) et ignorer la durée (100 et 600 ms). Les distances utilisées dans cette expérience étaient comparables aux distances utilisées dans les paradigmes étudiant les effets d'interférence espace-temps. L'idée était de mettre en place un protocole expérimental classique, qui respectait la condition "distance séquentielle"

nécessaire à l'émergence de l'effet Tau, et qui mettait en œuvre des tâches temporelles et spatiales équilibrées en termes de précision, mais pas en termes de coût cognitif. Les résultats ont montré que lorsque la précision dans les deux tâches était équivalente, mais que les temps de réaction étaient plus rapides dans la tâche spatiale, alors l'effet Kappa était plus important que l'effet Tau. Cela suggère que la demande en ressources cognitives des deux tâches n'était pas équilibrée.

La seconde expérience, "*Asymétrie inversée, Tau > Kappa*", était semblable à la première expérience. Cependant, les distances utilisées dans ce protocole expérimental étaient comprises entre 3.2° et 4.8°, au lieu d'être entre 1.6° et 12.8° comme lors de la première expérience (voir Figure 23). L'objectif était de réduire la discriminabilité des distances, pour entraver l'automatisme de l'estimation spatiale et forcer les participants à engager plus de ressources cognitives dans la tâche. L'objectif était donc d'augmenter la demande en ressources cognitives dans la tâche spatiale, afin de permettre l'émergence de l'effet Tau. Par conséquent, cette manipulation allait donc également estomper l'asymétrie des effets d'interférence (Kappa > Tau). Les résultats ont validé nos hypothèses, puisque réduire la discriminabilité des distances a permis d'obtenir un effet Tau plus important que l'effet Kappa. La précision dans la tâche spatiale était meilleure que dans la tâche temporelle, et les temps de réaction des participants étaient équivalents dans les deux tâches. Cette expérience nous semble offrir une preuve solide du lien existant entre l'effet Tau et la charge cognitive. Elle est par ailleurs, à notre connaissance, la première étude en modalité visuelle à mettre en évidence un effet Tau plus important que l'effet Kappa.

Dans le but de répliquer l'amplification de l'effet Tau, nous avons mené une troisième expérience, "*Amplification de Tau en intra-sujets*", dans laquelle la discriminabilité des distances était manipulée en intra-sujets. Cette manipulation avait pour objectif de tester la flexibilité de l'effet Tau chez un même participant. Les participants ont donc effectué deux

tâches spatiales. L'une des deux tâches utilisaient des distances très facilement discriminables, elles correspondaient à celles de la première expérience (distances de 1.6° à 12.8°). L'autre reprenait les distances utilisées dans la tâche spatiale de l'expérience 2, distances difficilement discriminables (distances de 3.2° à 4.8°). L'objectif initial était de démontrer que même dans un protocole en intra-sujets, l'effet Tau et les temps de réaction étaient plus importants lorsque la discriminabilité des distances était réduite. Une analyse préliminaire des résultats a mis en évidence un effet prononcé de l'ordre du bloc. Les modalités de "demande croissante" et "demande décroissante" ont donc été incluses dans les analyses statistiques. Les résultats ont montré que seuls les participants en condition Demande décroissante, c'est-à-dire ceux qui ont commencé par la tâche la plus exigeante en ressources cognitives, avaient un effet Tau. Effet, qui était par ailleurs plus important en condition Demandante qu'en condition Non demandante. De plus, ces participants sont également ceux pour qui il y avait une différence de temps de réaction entre les deux tâches. Les participants en condition Demande croissante ont dû se familiariser avec la tâche non demandante, limitant ainsi la quantité de ressources cognitives nécessaires à la résolution de la deuxième tâche (demandante). Cela expliquerait l'absence de différence entre les temps de réaction à ces deux tâches, et par conséquent l'absence de différence d'effet Tau entre les deux mêmes tâches. Les résultats de cette expérience renforcent donc nos résultats précédents puisqu'ils les répliquent en contexte intra-sujets. Elle constitue par ailleurs une preuve supplémentaire de l'existence d'un lien étroit entre l'émergence de l'effet Tau et les ressources cognitives engagées dans la tâche.

### ***Différences inter-individuelles et effets d'interférence***

La 4<sup>ème</sup> expérience, "*Adaptation méthodologique du protocole expérimental*", avait pour objectif de tester l'existence de potentiels biais méthodologiques. Le protocole expérimental de l'expérience 2 a été adapté en ce sens. Dans cette expérience, les magnitudes non pertinentes étaient déclinées en 5 modalités, contre seulement 2 lors des trois premières

études. Cette manipulation visait à empêcher que les effets d'interférence soient causés par une attraction vers des valeurs extrêmes saillantes (voir la théorie de la "*Polarity Correspondence*", Proctor & Cho, 2006). De plus, pour éviter des biais de réponse, fréquents quand des réponses dichotomiques sont utilisées, les participants devaient répondre en positionnant le curseur de la souris le long d'une barre verticale. Ce dispositif permettait d'obtenir des réponses plus précises que celles obtenues avec le système dichotomique des tâches de bissection classiques. Nos résultats répliquent ceux de la deuxième expérience, avec un effet Tau plus important que l'effet Kappa, accompagné d'une absence de différence significative des temps de réaction entre les tâches.

L'expérience suivante, "*Performances inter-individuelles et effets d'interférence*", avait pour but d'investiguer les différences interindividuelles. Le protocole était semblable à celui de l'expérience précédente, avec plus d'essais par condition expérimentale, et en réutilisant le système de réponse dichotomique. L'objectif de cette expérience était de mettre en lumière la relation entre les performances inter-individuelles des participants aux tâches de perception de durée et de distance et la force des effets d'interférence. L'idée était d'étudier dans quelles mesures la précision (indexée par les ratios de Weber) et la quantité de ressources cognitives engagées (indexée par les temps de réaction) étaient corrélés à la force des effets Tau et Kappa. Les résultats ont montré que plus un participant avait des temps de réaction lents, moins il était précis. Les participants sont en difficulté dans la tâche spatiale, ils ont besoin de temps pour traiter les informations et prendre une décision. De plus, la taille de l'effet Tau était corrélé avec les temps de réaction. Plus un participant était rapide pour estimer les distances, plus son effet Tau était important. Ce constat suggère que plus un participant est efficace pour traiter les distances, plus il subit l'effet Tau. Ces résultats illustrent également que l'augmentation des temps de réaction et de l'effet Tau sont deux conséquences du manque de discriminabilité des distances. Cependant, cela suggère également que l'augmentation de l'un n'était pas à l'origine

de l'augmentation de l'autre. Ces deux phénomènes seraient donc potentiellement des conséquences directes de l'augmentation du coût cognitif de la tâche. Par ailleurs, l'absence de variation de l'effet Kappa en fonction des temps de réaction nous laisse penser que l'effet Kappa n'est pas lié aux ressources cognitives engagées dans la tâche. Ainsi, ces résultats nous font émettre l'hypothèse que l'effet Tau émergerait durant la phase d'accumulation (liée à la mémoire de travail, et donc aux ressources cognitives), tandis que l'effet Kappa émergerait à un stade antérieur cette phase d'accumulation, expliquant son imperméabilité vis-à-vis du coût cognitif de la tâche.

### ***Effets d'interférence et émotions***

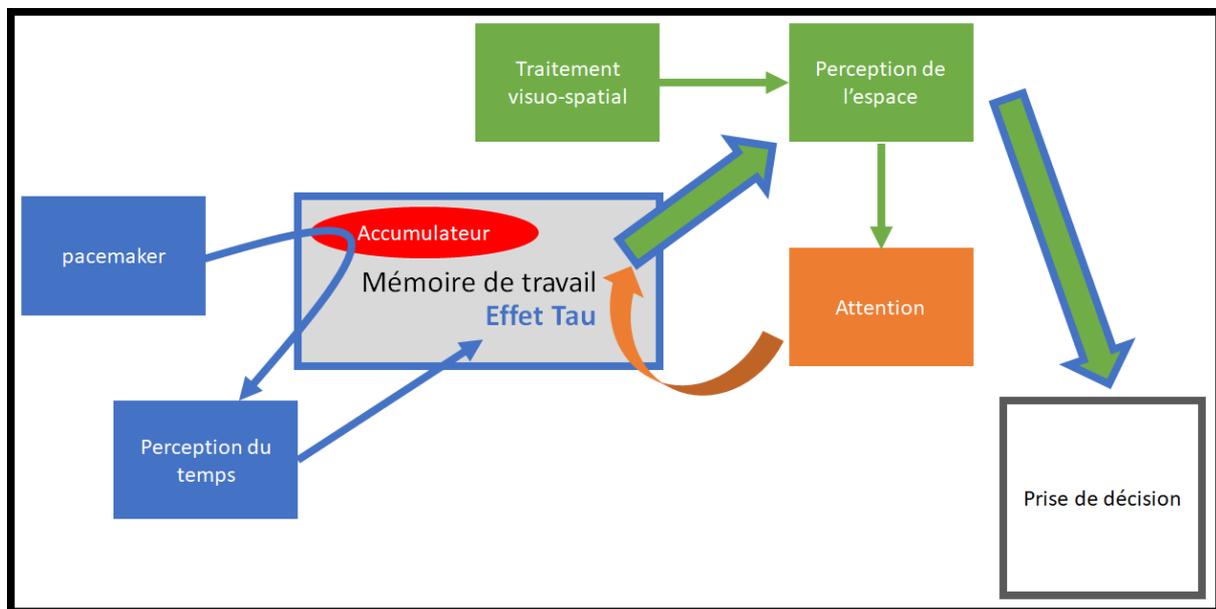
La dernière étude de cette thèse, "*L'impact des émotions sur les effets d'interférence*", se centre sur l'impact des émotions sur la perception du temps et de l'espace, ainsi que sur les effets d'interférence Tau et Kappa. Les participants ont effectué deux tâches d'estimations spatiales et deux tâches d'estimations temporelles. Les tâches étaient réalisées dans des contextes d'induction émotionnelle. Les participants étaient répartis en deux groupes, l'un pour lequel le contexte émotionnel était composé d'une induction neutre et d'une induction de peur (émotion à valence négative, et à fort arousal, voir Wiem & Lachiri, 2017). Tandis que l'autre groupe était plongé dans un contexte émotionnel neutre et de dégoût (émotion à valence négative, et à faible arousal, voir Wiem & Lachiri, 2017). Nos hypothèses étaient que l'induction émotionnelle de la peur entraînerait une distorsion des estimations de durée et de distance, et qu'elle biaiserait également les effets d'interférence. Cependant, au regard des résultats obtenus lors de nos précédentes études, nous avons supposé que l'effet Tau émergerait durant la phase de réactualisation des informations spatiales en mémoire de travail, et que l'effet Kappa émergerait potentiellement à un stade antérieur à la phase d'accumulation des informations temporelles en mémoire de travail. Nous avons par conséquent émis l'hypothèse que l'effet de l'émotion sur Tau pourrait être différent de l'effet de l'émotion sur

Kappa. L'analyse des données montre premièrement un effet des émotions similaire à ce qui est communément observé dans la littérature : Les émotions négatives à fort arousal, comme la peur, n'ont pas d'influence sur les estimations spatiales, mais provoquent une surestimation des durées. Cependant, ils ne corroborent pas les résultats obtenus par Droit-Volet (2013), puisque nous n'avons pas répliqué la surestimation des distances en condition émotionnelle. Deuxièmement, l'impact des émotions sur les effets d'interférence indique une augmentation de l'effet Kappa en condition d'induction de dégoût et de peur, mais aucune modulation de l'effet Tau. Bien que ces résultats soient encourageants, ils ne permettent pas d'identifier l'origine des effets Tau et Kappa. Ils constituent malgré tout un premier argument en faveur de l'hypothèse selon laquelle l'effet Kappa pourrait émerger à un stade antérieur à l'accumulation des informations temporelles en mémoire de travail.

### ***Interprétation théorique***

Ce travail de recherche nous a permis de montrer qu'il existait sans doute bel et bien un lien entre l'émergence de l'effet Tau et la demande en ressources cognitives dans la tâche spatiale. Nous avons mis en évidence qu'il était ainsi possible de renverser l'asymétrie habituellement obtenue dans la littérature vis-à-vis des effets Tau et Kappa. Dans le 5<sup>ème</sup> chapitre, nous avons ensuite pu optimiser le paradigme expérimental employé et tester la potentielle existence de biais méthodologiques. Nous avons apporté des éléments supplémentaires pour réaffirmer l'existence d'un lien entre l'effet Tau et les ressources cognitives engagées dans la tâche spatiale, contrairement à l'effet Kappa. Ce constat nous a amené à formuler des hypothèses quant à l'origine, la naissance, des effets Kappa et Tau. L'effet Tau émergerait potentiellement pendant le traitement de l'espace quand celui-ci nécessite des ressources mobilisant la mémoire de travail. Ces résultats pourraient probablement être interprétés grâce à une version actualisée du modèle de l'horloge interne. En effet, nous faisons l'hypothèse que l'information temporelle partirait du pacemaker,

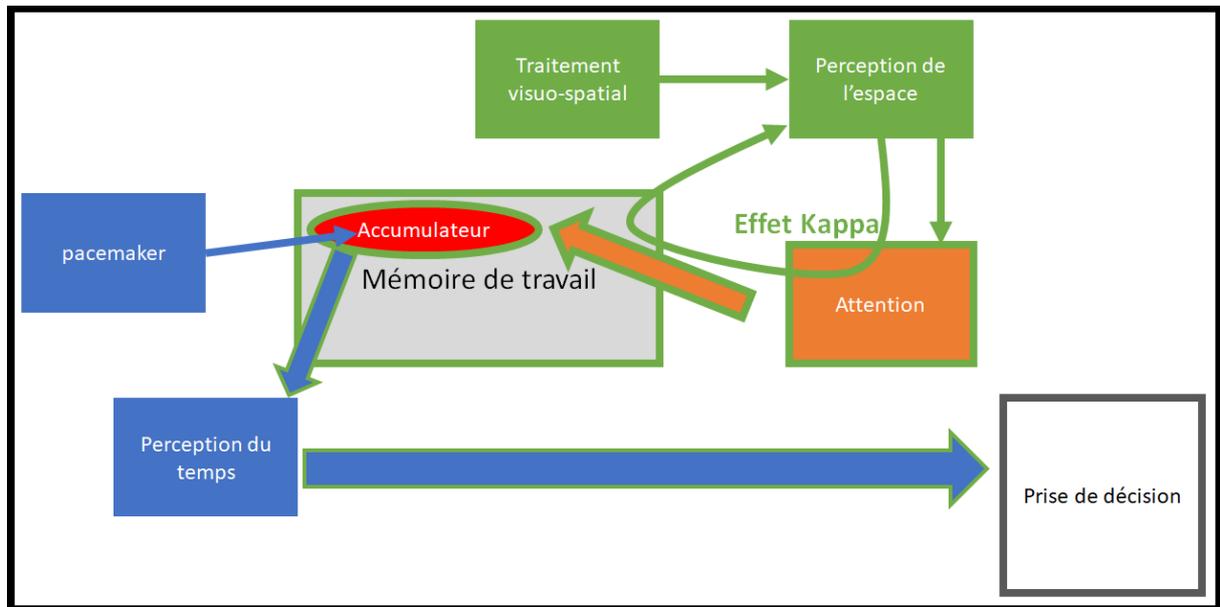
passerait par l'accumulateur au sein de la mémoire de travail, pour rejoindre le "module" de perception temporelle (voir Figure 38). Elle irait ensuite en mémoire de travail. À chaque réactualisation de l'information spatiale en mémoire de travail, l'information temporelle y laisserait des traces, qui, une fois l'information spatiale récupérée, biaiserait notre estimation de l'information spatiale (voir Figure 38). Selon notre hypothèse, l'effet Tau émergerait donc au sein de la mémoire de travail.



**Figure 38.** Représentation schématique de l'émergence de l'effet Tau lors d'une estimation spatiale, au regard des hypothèses que nous proposons. Les flèches fines représentent les processus automatiques et peu coûteux en ressources cognitives. Les flèches épaisses représentent les processus conscients et cognitivement coûteux. Les formes encadrées en bleu représentent les processus "contaminés" par l'information temporelle.

Parallèlement, l'effet Kappa émergerait à un stade antérieur au traitement des durées au sein de la mémoire de travail. Pendant une estimation de durée, l'apparition du deuxième stimulus à l'écran entraîne automatiquement la récupération en mémoire de l'information spatiale. La perception de ce stimulus engendrerait ensuite un signal activant l'attention, mais qui serait porteur de traces de l'information spatiale. L'attention enverrait un signal, lui aussi

"contaminé" par l'information spatiale, pour réouvrir l'interrupteur, contaminant ensuite l'accumulateur, qui au final terminerait sa course jusqu'à la perception temporelle (voir Figure 39). L'effet Kappa émergerait donc au niveau de l'attention, lorsque le signal pour activer l'accumulateur serait envoyé.

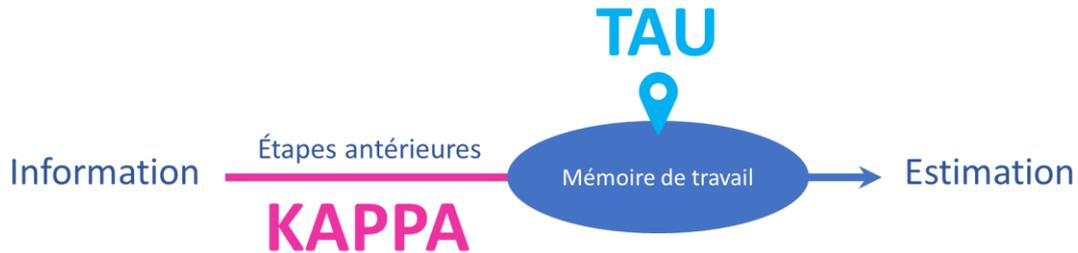


**Figure 39.** Représentation schématique de l'émergence de l'effet Kappa lors d'une estimation temporelle, au regard des hypothèses que nous proposons. Les flèches fines représentent les processus automatiques et peu coûteux en ressources cognitives. Les flèches épaisses représentent les processus conscients et cognitivement coûteux. Les formes encadrées en vert représentent les processus "contaminés" par l'information spatiale.

Néanmoins, il est à noter que ces propositions théoriques sont extrêmement spéculatives, et qu'elles ne représentent qu'une possible modélisation du processus d'estimation des durées et des distances, au regard de nos hypothèses.

Le sixième chapitre nous a permis, en partie, de tester nos hypothèses, en montrant que les émotions semblent impacter l'effet Kappa mais pas l'effet Tau. Cette étude apporte donc d'autres éléments de preuve pour appuyer l'idée d'une dissociation d'origine entre les effets Tau et Kappa. Durant le processus d'estimation d'une magnitude, l'effet Tau émergerait durant

l'étape de mémoire de travail, alors que l'effet Kappa émergerait durant une phase antérieure à cette étape de mémoire de travail (voir Figure 40).



**Figure 40.** Représentation schématique de l'émergence des effets Kappa et Tau lors d'une estimation de magnitude, au regard de l'interprétation théorique des résultats obtenus.

## Conclusion générale

### *Apports théoriques*

Selon les principaux courants théoriques modélisant un système commun du traitement des magnitudes, les effets d'interférence sont censés découler de l'organisation et de la potentielle hiérarchisation de ce système. Selon la théorie AToM (Bueti & Walsh, 2009 ; Walsh, 2003), les effets d'interférence entre les magnitudes devraient être réciproques, positivement corrélés, et symétriques. Cependant, au regard des constatations dans la littérature, des chercheurs ont suggéré que les magnitudes étaient hiérarchisées au sein du SCTM. Ainsi, selon la CMT, l'espace jouerait un rôle prépondérant, et le SCTM serait en fait articulé autour de notre capacité à estimer l'espace. Alors que la théorie AToM implique que les effets Tau et Kappa soient de force équivalente, la CMT se base quant à elle sur le constat récurrent que l'effet Kappa est plus important que l'effet Tau.

Néanmoins, nos études montrent qu'il est possible d'égaliser la force des effets Tau et Kappa, voire d'inverser l'asymétrie, en obtenant un effet Tau plus important que l'effet Kappa. Bien que ces résultats semblent être en faveur de la théorie AToM, les résultats obtenus dans le chapitre 5 nous ont suggéré une différence vis-à-vis du point d'émergence entre les effets Tau et Kappa. Notre positionnement en faveur de cette hypothèse s'est par la suite renforcé suite aux résultats obtenus dans le 6<sup>ème</sup> chapitre. En effet, outre le fait que les émotions n'ont pas le même impact sur le temps que sur l'espace (ce qui va cette fois à l'encontre de la théorie AToM), il s'avère que c'est aussi le cas pour les effets Tau et Kappa. L'augmentation de l'effet Kappa en condition d'induction émotionnelle pourrait s'expliquer par le fait qu'il émergerait à un stade antérieur au processus d'accumulation. Ainsi, nos études suggèrent que les effets Tau et Kappa ne partageraient pas une origine commune, avec un effet Kappa apparaissant plus tôt que l'effet Tau lors d'une estimation de magnitude. Cette interprétation suppose donc que les effets d'interférence espace-temps ne seraient pas tous deux issus du SCTM. Les autres processus jouant un rôle dans l'estimation de la magnitude pourraient être à l'origine de l'émergence de ces effets d'interférence. En conséquence, nous pensons que l'existence des effets d'interférence entre les magnitudes ne devrait pas constituer l'argumentaire principal pour défendre la validité d'un modèle théorique du système commun plutôt que l'autre. Le fait qu'il puisse y avoir des asymétries entre les effets d'interférence ne semble pas être représentatif de la façon avec laquelle serait organisée et potentiellement hiérarchisée le SCTM, puisque leurs origines semblent être liées à des processus distincts. À noter qu'il existe d'autres moyens permettant de mettre en évidence le fonctionnement et l'organisation du SCTM. Plusieurs études mettent en évidence l'existence de transferts entre les différentes magnitudes (de Hevia, Izard, Coubart, Spelke, & Streri, 2014 ; Lourenco, Ayzenberg & Lyu, 2016 ; Lourenco & Longo, 2010 ; Srinivasan & Carey, 2010). Certaines de ces études ont par exemple montré que le fait d'entraîner la capacité à estimer une magnitude permettait aussi d'améliorer

la précision dans l'estimation les autres magnitudes (Cappelletti et al., 2013 ; Meck & Church, 1983).

Globalement, nos études ne nous permettent pas de déterminer avec certitude lequel des deux modèles semble à ce jour le plus vraisemblable. Le fait que les effets d'interférence puissent émerger à des étapes différentes ne permet pas de réfuter une théorie au profit de l'autre. Cela permet cependant de remettre en question le point de départ (Kappa>Tau) justifiant la transposition de la CMT, provenant de recherches en psycholinguistique, aux études sur les magnitudes. La littérature sur l'ANS (approximate number system, voir Cantlon et al., 2009 ; Dehaene, 1997 ; Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen, 1998 ; Odic & Starr, 2018), sur le modèle de l'horloge interne (Coull, Cheng, & Meck, 2011 ; Coull & Nobre, 2008 ; Muller & Nobre, 2014 ; Gibbon et al., 1984), sur l'imperméabilité manifeste de l'espace vis-à-vis de l'impact des autres magnitudes (Alverson, 1994 ; Boroditsky & Gaby, 2010 ; Clark, 1973 ; Evans, 2004 ; Haspelmath, 1997 ; Lakoff & Johnson, 1980, 1999 ; Lakoff & Núñez, 2000 ; Traugott, 1978), ainsi que nos recherches, nous amènent à penser que plusieurs mécanismes, en dehors de l'hypothèse d'un SCTM, sont en jeu dans un processus d'estimation. En l'état, si nous devions considérer l'existence d'un SCTM, nous nous positionnerions plutôt en faveur de la théorie AToM, dans le sens où le principal argument en faveur de la CMT, l'asymétrie des effets d'interférence, ne semble pas corroboré par nos résultats expérimentaux. De plus, des études montrent qu'il existe manifestement une relation temps-numérosité (Balci & Gallistel, 2006 ; Kiesel & Vierck, 2009 ; Matlock et al., 2011) dont il est difficile de rendre compte dans le cadre de théorie de la CMT.

### ***Critique méthodologique***

Il convient de rester prudent vis-à-vis de l'apport théorique de nos études. Plusieurs critiques pourraient sans doute nous être adressées au regard des protocoles expérimentaux

employés. Par exemple, bien que les temps de réaction dans nos analyses semblent être un moyen pertinent pour déterminer la quantité de ressources cognitives engagées dans les tâches, ils n'en sont pas une parfaite mesure. L'utilisation d'une barre verticale comme système de réponse dans certaines de nos expériences, engendre nécessairement des variations des temps de réaction, puisque les participants devaient effectuer un mouvement de la main pour pouvoir répondre, alors que le système dichotomique de réponse permet de rendre les temps de réponse plus représentatifs du temps de prise de décision des participants. D'un autre côté, le système de réponse dichotomique fournit une mesure moins sensible pour percevoir les petites variations d'estimation dues aux effets d'interférence, que le système de réponse continu utilisant la barre verticale. Nous avons néanmoins répliqué la supériorité de l'effet Tau vis-à-vis de l'effet Kappa engendrée par l'augmentation en coût cognitif de la tâche spatiale, avec ces deux systèmes de réponse. Par ailleurs, il est important de noter que dans le but d'éviter un potentiel effet de la vitesse (Henry & McAuley, 2009 ; Henry, McAuley & Zaleha, 2009 ; Reali, Lleras & Alviar, 2019), les distances utilisées dans nos paradigmes étaient séquentielles mais non-progressives. Par conséquent, les participants accumulaient bel et bien de l'information lorsqu'ils estimaient des distances, mais pas spécifiquement de l'information spatiale, puisque la distance totale n'était révélée qu'à la fin de chaque essai, à l'apparition du deuxième point. Il est possible que des résultats différents puissent-être observés avec des distances séquentielles et progressives, à l'instar des résultats obtenus par Droit-Volet (2013) montrant un effet des émotions similaire sur toutes les magnitudes (surestimation de l'espace et de la numérosité sous l'effet d'une émotion négative à fort arousal), en utilisant ce type de stimuli. Ainsi, bien que nous ayons utilisé les deux systèmes de réponse à plusieurs reprises, et que nous ayons répliqué certains de nos résultats au cours de cette thèse, nos paradigmes expérimentaux ne sont sans doute pas exempts de possibles biais méthodologiques. Un nombre

plus important d'études et de répliques sont probablement encore nécessaires pour formellement statuer sur l'origine des effets Tau et Kappa.

### ***Ouvertures en recherche fondamentale***

Sur le plan fondamental, il serait intéressant d'effectuer des recherches analogues à celles constituant ce travail de thèse, sur les autres effets d'interférence entre les magnitudes (temps-numérosité et espace-numérosité). Premièrement, les découvertes sur les conditions nécessaires à l'émergence de l'effet du temps sur l'espace pourraient potentiellement servir à mettre en place un protocole expérimental respectant ces mêmes conditions (séquentialité des stimuli et régulation du coût cognitif des tâches) afin d'étudier un éventuel effet du temps sur la numérosité. Il serait d'ailleurs pertinent là aussi de chercher à déterminer si les autres effets d'interférence entre les magnitudes émergeraient également à des moments différents dans le processus d'estimation. Pour commencer à travailler sur ce sujet, nous avons d'ailleurs d'ores et déjà effectué 5 pré-tests afin de mettre en place une expérience sur les effets d'interférence temps-numérosité. Le protocole expérimental est constitué de deux tâches de bissection, une tâche numérique et une tâche temporelle. À chaque essai, 4 nuages de points sont affichés rapidement à l'écran. Le nombre total de points des 4 nuages additionnés, et la durée entre chaque nuage de points, varient d'un essai à l'autre. Les participants doivent soit estimer la durée totale de l'essai, soit le nombre total de points affichés. L'expérience sera en phase de pré-test jusqu'à ce que nous puissions obtenir un protocole expérimental pour lequel les WRs et les TRs des deux tâches soient équilibrés. L'objectif est d'étudier les effets d'interférence entre le temps et la numérosité, leur asymétrie, leurs conditions d'émergence, et leurs origines, dans la continuité de nos actuels travaux sur les effets Tau et Kappa.

En parallèle, nous pensons que les études comportementales sur le SCTM pourraient davantage se concentrer sur des protocoles expérimentaux permettant de mettre en lumière des

liens entre les magnitudes sans passer par l'analyse direct des effets d'interférence. Pour cela, nous pensons qu'il est préférable de se concentrer sur des protocoles expérimentaux étudiant des interférences susceptibles d'impacter similairement chacune des magnitudes, à l'instar de l'effet de distance et de l'effet de taille (Cohen Kadosh et al., 2005 ; Droit-Volet, Tourret & Wearden, 2004 ; Fias et al., 2003 ; Henmon, 1906 ; Kaufmann et al., 2005 ; Pinel et al., 2004). Les protocoles sur les transferts entre les magnitudes semblent être un bon moyen pour faire avancer les recherches sur les estimations de magnitudes (Cappelletti et al., 2013 ; Hevia, Izard, Coubart, Spelke, & Streri, 2014 ; Lourenco, Ayzenberg & Lyu, 2016 ; Lourenco & Longo, 2010 ; Srinivasan & Carey, 2010). Il serait par ailleurs intéressant d'employer les jeux-vidéos comme moyen de transfert entre magnitudes, puisque ceux-ci semblent pouvoir améliorer de multiples processus cognitifs (Boot, Blakely & Simons, 2011 ; Perrot, Maillot & Hartley, 2019). Il serait par exemple pertinent d'étudier la pratique de jeux de plateforme 2D tels que Mario Bross ou Ultimate Chicken Horse, pour déterminer si cela permettrait, à terme, d'améliorer les capacités de traitement de l'espace. Ce type de jeu n'exige pas spécialement de traiter de la numérosité, mais il nécessite d'effectuer des mouvements/sauts précis avec un personnage, en nous basant sur la distance entre le début du mouvement et la fin du mouvement. Nous pourrions par ailleurs étudier la possibilité de produire un transfert des capacités acquises suite à un entraînement sur ce type de jeu, en s'intéressant également au lien entre la pratique de ce type de jeu, et la possible amélioration des capacités d'estimation de la numérosité.

### ***Applications des études sur le traitement des magnitudes***

Les recherches sur notre capacité à estimer les magnitudes sont capitales. De nombreuses études ont mis en évidence que la capacité à estimer de la numérosité est corrélée avec de bonnes aptitudes en mathématiques à l'école (Bonny & Lourenco, 2013 ; Chen & Li, 2014 ; Chu & Geary, 2015 ; Odic et al., 2016). Il a par ailleurs été démontré que la performance d'enfants d'âge préscolaire pour estimer la numérosité était prédictive de leurs futures

performances en mathématiques à l'école (Chu & Geary, 2015 ; Libertus, Feigenson, & Halberda, 2013 ; Starr, Libertus, & Brannon, 2013 ; van Marle, Chu, Li, & Geary, 2014). Ces études montrent qu'un enfant ayant une bonne précision pour discriminer deux nuages de points réussit mieux les tests de mathématiques (Anobile, Castaldi, Turi, Tinelli, & Burr, 2016), et que réciproquement, les meilleures élèves en mathématiques sont les plus précis pour estimer de la numérosité (Wang et al., 2017). Ainsi, étudier plus en profondeur le fonctionnement du SCTM pourrait permettre d'apporter de nouvelles connaissances et méthodes d'apprentissage des mathématiques.

Les recherches sur les magnitudes trouvent également des applications concrètes dans la conduite automobile. Les études expérimentales utilisent fréquemment des tâches de "*time-to-collision*" dans lesquelles des déplacements d'objets doivent être appréhendés (Bootsma & Oudejans, 1993 ; McLeod & Ross, 1983 ; Vagnoni, Andreanidou, Lourenco & Longo, 2017 ; van Der Horst & Hogema, 1993). Ces tâches présentent l'intérêt d'être constituées d'estimations temporelles, en fonction de la distance et de la vitesse. Les recherches sur le lien entre les magnitudes prennent tout leur sens dans les situations écologiques dans lesquelles toutes ces dimensions se mélangent et interagissent. Cavallo et Laurent (1988) ont ainsi établi que l'estimation de la distance jouait un rôle dans l'estimation du "*time-to-collision*". Ces recherches aident ainsi à comprendre la perception du temps dans diverses situations de la vie courante, durant une activité sportive, ou la pratique de jeux-vidéos par exemple. Ce champ de recherche est par ailleurs bénéfique pour la compréhension du fonctionnement cognitif en situation de conduite. En effet, de nombreuses recherches basées sur les apports théoriques sur le *time-to-collision* étudient la perception du temps en situation de conduite automobile (Lodinger & DeLucia, 2019 ; Hoffmann & Mortimer, 1994 ; Sahaï, Labeye, Caroux & Lemerrier, 2021).

D'autres applications des recherches sur la perception des magnitudes pourraient d'ailleurs être investiguées. Il est par exemple intéressant de remarquer que les GPS sont des outils faisant travailler les transferts d'estimations entre les magnitudes. Lorsque nous regardons le GPS pour savoir dans combien de temps nous devons tourner, le GPS nous affiche la distance en chiffre (par exemple "dans 800 m, tournez à droite"), nous devons estimer la distance que cela représente en nous basant sur l'information numérique (800), puis nous estimons le temps d'attente nécessaire pour parcourir cette distance estimée. Ainsi, nous basons notre estimation temporelle sur notre estimation spatiale, elle-même basée sur l'information numérique fournie par le GPS. Il serait par exemple intéressant d'effectuer des recherches pour déterminer s'il ne serait pas plus judicieux que le GPS affiche directement la durée restante (calculée en fonction de sa vitesse) avant de tourner, plutôt que d'afficher la distance. Cela pourrait permettre de retirer une étape de traitement de l'information, en passant de "numérosité  $\Rightarrow$  espace  $\Rightarrow$  temps" à directement "numérosité  $\Rightarrow$  temps".

Ce travail de thèse nous laisse par conséquent une multitude de possibilités sur lesquels travailler à l'avenir afin de mieux comprendre les processus d'estimations des magnitudes, et ainsi faire avancer les connaissances sur le fonctionnement de la cognition humaine.

*Ce n'est pas l'énormité de la tâche qui importe, mais la magnitude de notre courage (Ricard, 2011).*

## Bibliographie

- Alexander, I., Cowey, A., & Walsh, V. (2005). The right parietal cortex and time perception: back to Critchley and the Zeitraffer phenomenon. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3-4), 306-315. <https://doi.org/10.1080/02643290442000356>
- Alpers, G. W., & Gerdes, A. B. M. (2007). Here is looking at you: Emotional faces predominate in binocular rivalry. *Emotion*, 7(3), 495–506. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.3.495>
- Alpers, G. W., Ruhleder, M., Walz, N., Mühlberger, A., & Pauli, P. (2005). Binocular rivalry between emotional and neutral stimuli: A validation using fear conditioning and EEG. *International Journal of Psychophysiology*, 57(1), 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.01.008>
- Alverson, H. (1994). *Semantics and experience: Universal metaphors of time in English, Mandarin, Hindi, and Sesotho*. Johns Hopkins University Press.
- Anderson, A. K., & Phelps, E. A. (2001). Lesions of the human amygdala impair enhanced perception of emotionally salient events. *Nature*, 411(6835), 305-309. <https://doi.org/10.1038/35077083>
- Anderson, L., & Shimamura, A. P. (2005). Influences of emotion on context memory while viewing film clips. *The American journal of psychology*, 323-337. <https://www.jstor.org/stable/30039069>
- Anobile, G., Castaldi, E., Turi, M., Tinelli, F., & Burr, D. C. (2016). Numerosity but not texture-density discrimination correlates with math ability in children. *Developmental psychology*, 52(8), 1206. <https://doi.org/10.1037/dev0000155>
- Ansari, D., Dhital, B., & Siong, S. C. (2006). Parametric effects of numerical distance on the intraparietal sulcus during passive viewing of rapid numerosity changes. *Brain research*, 1067(1), 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.10.083>

- Artieda, J., Pastor, M. A., Lacruz, F., & Obeso, J. A. (1992). Temporal discrimination is abnormal in Parkinson's disease. *Brain*, *115*(1), 199-210. <https://doi.org/10.1093/brain/115.1.199>
- Ashkenazi, S., Henik, A., Ifergane, G., & Shelef, I. (2008). Basic numerical processing in left intraparietal sulcus (IPS) acalculia. *Cortex*, *44*(4), 439-448. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.008>
- Assmus, A., Marshall, J. C., Noth, J., Zilles, K., & Fink, G. R. (2005). Difficulty of perceptual spatiotemporal integration modulates the neural activity of left inferior parietal cortex. *Neuroscience*, *132*(4), 923-927. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.01.047>
- Assmus, A., Marshall, J. C., Ritzl, A., Noth, J., Zilles, K., & Fink, G. R. (2003). Left inferior parietal cortex integrates time and space during collision judgments. *Neuroimage*, *20*, S82-S88. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.09.025>
- Bacon, S. J. (1974). Arousal and the range of cue utilization. *Journal of Experimental Psychology*, *102*(1), 81-87. <https://doi.org/10.1037/h0035690>
- Badets, A., Andres, M., Di Luca, S., & Pesenti, M. (2007). Number magnitude potentiates action judgements. *Experimental Brain Research*, *180*(3), 525-534. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-0870-y>
- Badets, A., Boutin, A., & Heuer, H. (2015). Mental representations of magnitude and order: A dissociation by sensorimotor learning. *Acta psychologica*, *157*, 164-175. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.03.004>
- Baker, J. M., Rodzon, K., & Jordan, K. (2013). The impact of emotion on numerosity estimation. *Frontiers in Psychology*, *4*, 521. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00521>
- Balci, F., & Gallistel, C. R. (2006). Cross-domain transfer of quantitative discriminations: Is it all a matter of proportion? *Psychonomic Bulletin & Review*, *13*(4), 636-642. <https://doi.org/10.3758/BF03193974>

- Basso, G., Nichelli, P., Frassinetti, F., & Di Pellegrino, G. (1996). Time perception in a neglected space. *Neuroreport*, 7(13), 2111-2114. <https://doi.org/10.1097/00001756-199609020-00009>
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1997). Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, 275(5304), 1293-1295. DOI: 10.1126/science.275.5304.1293
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (2005). The Iowa Gambling Task and the somatic marker hypothesis: some questions and answers. *Trends in cognitive sciences*, 9(4), 159-162. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.02.002>
- Belin, P., Zatorre, R. J., & Ahad, P. (2002). Human temporal-lobe response to vocal sounds. *Cognitive Brain Research*, 13(1), 17-26. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(01\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(01)00084-2)
- Berlyne, D. E. (1969). Arousal, reward and learning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 159(3), 1059-1070. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1969.tb12997.x>
- Bernstein, D. P. (2002). Cognitive therapy of personality disorders in patients with histories of emotional abuse or neglect. *Psychiatric Annals*, 32(10), 618. <https://doi.org/10.3928/0048-5713-20021001-10>
- Bhalla, M., & Proffitt, D. R. (1999). Visual-motor recalibration in geographical slant perception. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 25(4), 1076. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.25.4.1076>
- Bisiach, E., & Luzzatti, C. (1978). Unilateral neglect of representational space. *Cortex*, 14(1), 129-133. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(78\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(78)80016-1)
- Bjoertomt, O., Cowey, A., & Walsh, V. (2002). Spatial neglect in near and far space investigated by repetitive transcranial magnetic stimulation. *Brain*, 125(9), 2012-2022. <https://doi.org/10.1093/brain/awf211>

- Bless, H. (2000). The interplay of affect and cognition: The mediating role of general knowledge structures. In J. P. Forgas (Ed.), *Feeling and thinking: The role of affect in social cognition* (pp. 201–222). Cambridge University Press.
- Bless, H., & Fiedler, K. (2006). Mood and the regulation of information processing and behavior. In J. P. Forgas (Ed.), *Affect in social thinking and behavior* (pp. 65–84). Psychology Press.
- Bonny, J. W., & Lourenco, S. F. (2013). The approximate number system and its relation to early math achievement: Evidence from the preschool years. *Journal of experimental child psychology, 114*(3), 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.09.015>
- Boot, W. R., Blakely, D. P., & Simons, D. J. (2011). Do action video games improve perception and cognition? *Frontiers in psychology, 2*, 226. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00226>
- Bootsma, R. J., & Oudejans, R. R. D. (1993). Visual information about time-to-collision between two objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 19*(5), 1041–1052. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.19.5.1041>
- Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring: Understanding time through spatial metaphors. *Cognition, 75*(1), 1-28.
- Boroditsky, L., & Gaby, A. (2010). Remembrances of times East: absolute spatial representations of time in an Australian aboriginal community. *Psychological science, 21*(11), 1635-1639. <https://doi.org/10.1177/0956797610386621>
- Bottini, R., & Casasanto, D. (2013). Space and time in the child's mind: metaphoric or ATOMIC? *Frontiers in psychology, 4*, 803. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00803>
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry, 25*(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)

- Brannon, E. M., Lutz, D., & Cordes, S. (2006). The development of area discrimination and its implications for number representation in infancy. *Developmental science*, *9*(6), F59-F64. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00530.x>
- Brannon, E. M., Suanda, S., & Libertus, K. (2007). Temporal discrimination increases in precision over development and parallels the development of numerosity discrimination. *Developmental science*, *10*(6), 770-777. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00635.x>
- Brosch, T., Coppin, G., Schwartz, S., & Sander, D. (2012). The importance of actions and the worth of an object: dissociable neural systems representing core value and economic value. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *7*(5), 497-505. <https://doi.org/10.1093/scan/nsr036>
- Brosch, T., Pourtois, G., Sander, D., & Vuilleumier, P. (2011). Additive effects of emotional, endogenous, and exogenous attention: behavioral and electrophysiological evidence. *Neuropsychologia*, *49*(7), 1779-1787. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.056>
- Brosschot, J. F., & Thayer, J. F. (2003). Heart rate response is longer after negative emotions than after positive emotions. *International journal of psychophysiology*, *50*(3), 181-187. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(03\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00146-6)
- Brown, R., & Kulik, J. (1977). Flashbulb memories. *Cognition*, *5*(1), 73-99. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(77\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0010-0277(77)90018-X)
- Brus, J., Heng, J. A., & Polanía, R. (2019). Weber's law: A mechanistic foundation after two centuries. *Trends in cognitive sciences*, *23*(11), 906-908. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.09.001>
- Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1525), 1831-1840. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0028>

- Bueti, D., Bahrami, B., & Walsh, V. (2008). Sensory and association cortex in time perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(6), 1054-1062. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20060>
- Cahill, L., & McGaugh, J. L. (1998). Mechanisms of emotional arousal and lasting declarative memory. *Trends in neurosciences*, 21(7), 294-299. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(97\)01214-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(97)01214-9)
- Cai, Z. G., & Connell, L. (2015). Space–time interdependence: Evidence against asymmetric mapping between time and space. *Cognition*, 136, 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.11.039>
- Cai, Z. G., & Connell, L. (2016). On magnitudes in memory: An internal clock account of space–time interaction. *Acta Psychologica*, 168, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.04.003>
- Cai, Z. G., & Wang, R. (2021). Cross-dimensional magnitude interaction is modulated by representational noise: evidence from space–time interaction. *Psychological Research*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01472-4>
- Cai, Z. G., Connell, L., & Holler, J. (2013). Time does not flow without language: Spatial distance affects temporal duration regardless of movement or direction. *Psychonomic bulletin & review*, 20(5), 973-980. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0414-3>
- Cai, Z. G., Wang, R., Shen, M., & Speekenbrink, M. (2018). Cross-dimensional magnitude interactions arise from memory interference. *Cognitive psychology*, 106, 21-42. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2018.08.001>
- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J., & Pelphrey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS biology*, 4(5), e125. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125>
- Cantlon, J. F., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in cognitive sciences*, 13(2), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.007>

- Cappelletti, M., Barth, H., Fregni, F., Spelke, E. S., & Pascual-Leone, A. (2007). rTMS over the intraparietal sulcus disrupts numerosity processing. *Experimental Brain Research*, *179*(4), 631-642. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0820-0>
- Cappelletti, M., Gessaroli, E., Hithersay, R., Mitolo, M., Didino, D., Kanai, R., Cohen Kadosh, R., & Walsh, V. (2013). Transfer of cognitive training across magnitude dimensions achieved with concurrent brain stimulation of the parietal lobe. *Journal of Neuroscience*, *33*(37), 14899-14907. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1692-13.2013>
- Carretié, L. (2014). Exogenous (automatic) attention to emotional stimuli: a review. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *14*(4), 1228-1258. <https://doi.org/10.3758/s13415-014-0270-2>
- Casasanto, D., & Boroditsky, L. (2008). Time in the mind: Using space to think about time. *Cognition*, *106*(2), 579-593. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.03.004>
- Casasanto, D., Fotakopoulou, O., & Boroditsky, L. (2010). Space and time in the child's mind: Evidence for a cross-dimensional asymmetry. *Cognitive science*, *34*(3), 387-405. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2010.01094.x>
- Castelli, F., Glaser, D. E., & Butterworth, B. (2006). Discrete and analogue quantity processing in the parietal lobe: A functional MRI study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(12), 4693-4698.
- Cavallo, V., & Laurent, M. (1988). Visual information and skill level in time-to-collision estimation. *Perception*, *17*(5), 623-632. <https://doi.org/10.1068/p170623>
- Charlesworth, W. R., & Kreutzer, M. A. (1973). Facial expressions of infants and children. *Darwin and facial expression: A century of research in review*, 91-168. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1014.2181&rep=rep1&type=pdf>
- Chen, Q., & Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance: A meta-analysis. *Acta psychologica*, *148*, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>

- Christopoulos, G. I., Uy, M. A., & Yap, W. J. (2019). The body and the brain: Measuring skin conductance responses to understand the emotional experience. *Organizational Research Methods*, 22(1), 394-420. <https://doi.org/10.1177/1094428116681073>
- Chu, F. W., & Geary, D. C. (2015). Early numerical foundations of young children's mathematical development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 132, 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.01.006>
- Church, R. M., & Deluty, M. Z. (1977). Bisection of temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 3(3), 216. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.3.3.216>
- Cipolotti, L., Butterworth, B., & Denes, G. (1991). A specific deficit for numbers in a case of dense acalculia. *Brain*, 114(6), 2619-2637. <https://doi.org/10.1093/brain/114.6.2619>
- Clark, H. H. (1973). Space, time, semantics, and the child. In *Cognitive development and acquisition of language* (pp. 27-63). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-505850-6.50008-6>
- Clore, G. L., & Palmer, J. (2009). Affective guidance of intelligent agents: How emotion controls cognition. *Cognitive systems research*, 10(1), 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2008.03.002>
- Codispoti, M., Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2001). Affective reactions to briefly presented pictures. *Psychophysiology*, 38(3), 474-478. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3830474>
- Cohen Kadosh, R., & Henik, A. (2006). A common representation for semantic and physical properties: A cognitive-anatomical approach. *Experimental psychology*, 53(2), 87-94. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.2.87>
- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Linden, D. E., Gevers, W., Berger, A., & Henik, A. (2007). The brain locus of interaction between number and size: A combined functional magnetic resonance imaging and event-related potential study. *Journal of cognitive neuroscience*, 19(6), 957-970 <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.6.957>

- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Schuhmann, T., Kaas, A., Goebel, R., Henik, A., & Sack, A. T. (2007). Virtual dyscalculia induced by parietal-lobe TMS impairs automatic magnitude processing. *Current Biology*, *17*(8), 689-693. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.02.056>
- Cohen Kadosh, R., Henik, A., Rubinsten, O., Mohr, H., Dori, H., Van De Ven, V., Zorzi, M., Hendler, T., Goebel, R., & Linden, D. E. (2005). Are numbers special?: The comparison systems of the human brain investigated by fMRI. *Neuropsychologia*, *43*(9), 1238-1248. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.12.017>
- Cohen, J., Hansel, C. E. M., & Sylvester, J. D. (1953). A new phenomenon in time judgment. *Nature*, *172*(4385), 901-901. <https://doi.org/10.1038/172901a0>
- Cona, G., Wiener, M., & Scarpazza, C. (2021). From ATOM to GradiATOM: Cortical gradients support time and space processing as revealed by a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, *224*, 117407. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117407>
- Coull, J. T. (2004). fMRI studies of temporal attention: allocating attention within, or towards, time. *Cognitive Brain Research*, *21*(2), 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.02.011>
- Coull, J. T., & Droit-Volet, S. (2018). Explicit understanding of duration develops implicitly through action. *Trends in cognitive sciences*, *22*(10), 923-937. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.07.011>
- Coull, J. T., & Nobre, A. C. (2008). Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current opinion in neurobiology*, *18*(2), 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.07.011>
- Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., & Vidal, F. (2015). SMA selectively codes the active accumulation of temporal, not spatial, magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *27*(11), 2281-2298. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00854](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00854)

- Coull, J. T., Cheng, R. K., & Meck, W. H. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology*, *36*(1), 3-25. <https://doi.org/10.1038/npp.2010.113>
- Coull, J. T., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science*, *303*(5663), 1506-1508. <https://doi.org/10.1126/science.1091573>
- Craik, F. I. M., Govoni, R., Naveh-Benjamin, M., & Anderson, N. D. (1996). The effects of divided attention on encoding and retrieval processes in human memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *125*(2), 159–180. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.125.2.159>
- Critchley, H. D., Elliott, R., Mathias, C. J., & Dolan, R. J. (2000). Neural activity relating to generation and representation of galvanic skin conductance responses: a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, *20*(8), 3033-3040. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-08-03033.2000>
- Damasio, A. R. (1995). On Some Functions of the Human Prefrontal Cortex a. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *769*(1), 241-252. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1995.tb38142.x>
- Danckert, J., Ferber, S., Pun, C., Broderick, C., Striemer, C., Rock, S., & Stewart, D. (2007). Neglected time: impaired temporal perception of multisecond intervals in unilateral neglect. *Journal of cognitive neuroscience*, *19*(10), 1706-1720. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.10.1706>
- De Hevia, M. D., Girelli, L., Bricolo, E., & Vallar, G. (2008). The representational space of numerical magnitude: Illusions of length. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(10), 1496-1514. <https://doi.org/10.1080/17470210701560674>
- de Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(13), 4809-4813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323628111>

- Dehaene, S. (1997). Comment notre cerveau calcule-t-il? *Pour la science*, 236, 50-57.  
[https://www.unicog.org/publications/DehaeneS1997Comment%20\\_notre\\_%20cerveauPourlaScience.pdf](https://www.unicog.org/publications/DehaeneS1997Comment%20_notre_%20cerveauPourlaScience.pdf)
- Dehaene, S. (2002). Single-neuron arithmetic. *Science*, 297(5587), 1652-1653.  
<https://doi.org/10.1126/science.1076392>
- Dehaene, S., & Changeux, J. P. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of cognitive neuroscience*, 5(4), 390-407.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219-250.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70002-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70002-9)
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of experimental psychology: General*, 122(3), 371.  
<https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in neurosciences*, 21(8), 355-361.  
[https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(98\)01263-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(98)01263-6)
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive neuropsychology*, 20(3-6), 487-506.  
<https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- DeWind, N. K., Adams, G. K., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2015). Modeling the approximate number system to quantify the contribution of visual stimulus features. *Cognition*, 142, 247-265.
- Dirnberger, G., Hesselmann, G., Roiser, J. P., Preminger, S., Jahanshahi, M., & Paz, R. (2012). Give it time: Neural evidence for distorted time perception and enhanced memory encoding in emotional situations. *Neuroimage*, 63(1), 591-599.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.06.041>

- Dormal, V., & Pesenti, M. (2007). Numerosity-length interference: A Stroop experiment. *Experimental Psychology*, *54*(4), 289-297. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.54.4.289>
- Dormal, V., & Pesenti, M. (2013). Processing numerosity, length and duration in a three-dimensional Stroop-like task: towards a gradient of processing automaticity? *Psychological research*, *77*(2), 116-127. <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0414-3>
- Dormal, V., Andres, M., & Pesenti, M. (2008). Dissociation of numerosity and duration processing in the left intraparietal sulcus: a transcranial magnetic stimulation study. *Cortex*, *44*(4), 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.011>
- Dormal, V., Andres, M., & Pesenti, M. (2012). Contribution of the right intraparietal sulcus to numerosity and length processing: An fMRI-guided TMS study. *Cortex*, *48*(5), 623-629. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.019>
- Dormal, V., Larigaldie, N., Lefèvre, N., Pesenti, M., & Andres, M. (2018). Effect of perceived length on numerosity estimation: Evidence from the Müller-Lyer illusion. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(10), 2142-2151. <https://doi.org/10.1177/1747021817738720>
- Dormal, V., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Numerosity-duration interference: A Stroop experiment. *Acta psychologica*, *121*(2), 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.06.003>
- Droit-Volet, S. (2013). Emotion and magnitude perception: number and length bisection. *Frontiers in neurorobotics*, *7*, 24. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2013.00024>
- Droit-Volet, S., Brunot, S., & Niedenthal, P. (2004). BRIEF REPORT Perception of the duration of emotional events. *Cognition and emotion*, *18*(6), 849-858. <https://doi.org/10.1080/02699930341000194>
- Droit-Volet, S., Clément, A., & Fayol, M. (2003). Time and number discrimination in a bisection task with a sequence of stimuli: A developmental approach. *Journal of experimental child psychology*, *84*(1), 63-76. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(02\)00180-7](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00180-7)

- Droit-Volet, S., Turrett, S., & Wearden, J. (2004). Perception of the duration of auditory and visual stimuli in children and adults. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 57(5), 797-818. <https://doi.org/10.1080/02724980343000495>
- Easterbrook, J. A. (1959). The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior. *Psychological Review*, 66(3), 183–201. <https://doi.org/10.1037/h0047707>
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Duncker & Humblot.
- Edelstein, R. S. (2006). Attachment and emotional memory: Investigating the source and extent of avoidant memory impairments. *Emotion*, 6(2), 340–345. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.2.340>
- Ekman, P., & Oster, H. (1979). Facial expressions of emotion. *Annual review of psychology*, 30(1), 527-554. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.30.020179.002523>
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429-433. <https://doi.org/10.1038/415429a>
- Evans, V. (2004). 22 How we conceptualise time: language, meaning and temporal cognition. *The cognitive linguistics reader*, 733. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.133.3196&rep=rep1&type=pdf>
- Fairfield, B., Mammarella, N., Di Domenico, A., & Palumbo, R. (2015). Running with emotion: When affective content hampers working memory performance. *International Journal of Psychology*, 50(2), 161-164. <https://doi.org/10.1002/ijop.12101>
- Fernández, C., Pascual, J. C., Soler, J., Elices, M., Portella, M. J., & Fernández-Abascal, E. (2012). Physiological responses induced by emotion-eliciting films. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 37(2), 73-79.
- Ferrandez, A. M., Hugueville, L., Lehericy, S., Poline, J. B., Marsault, C., & Pouthas, V. (2003). Basal ganglia and supplementary motor area subtend duration perception: an

- fMRI study. *Neuroimage*, 19(4), 1532-1544. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00159-9)
- Ferrigno, S., Jara-Ettinger, J., Piantadosi, S. T., & Cantlon, J. F. (2017). Universal and uniquely human factors in spontaneous number perception. *Nature communications*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/ncomms13968>
- Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P., & Orban, G. A. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of cognitive neuroscience*, 15(1), 47-56. <https://doi.org/10.1162/089892903321107819>
- Fiedler, K. (2001). Affective states trigger processes of assimilation and accommodation. In L. L. Martin & G. L. Clore (Eds.), *Theories of mood and cognition: A user's guidebook* (pp. 85–98). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Fierro, B., Brighina, F., Oliveri, M., Piazza, A., La Bua, V., Buffa, D., & Bisiach, E. (2000). Contralateral neglect induced by right posterior parietal rTMS in healthy subjects. *Neuroreport*, 11(7), 1519-1521. <https://doi.org/10.1097/00001756-200005150-00031>
- Fierro, B., Brighina, F., Piazza, A., Oliveri, M., & Bisiach, E. (2001). Timing of right parietal and frontal cortex activity in visuo-spatial perception: a TMS study in normal individuals. *Neuroreport*, 12(11), 2605-2607. <https://doi.org/10.1097/00001756-200108080-00062>
- Fink, G. R., Marshall, J. C., Shah, N. J., Weiss, P. H., Halligan, P. W., Grosse-Ruyken, M., Ziemons, K., Zilles, K., & Freund, H. J. (2000). Line bisection judgments implicate right parietal cortex and cerebellum as assessed by fMRI. *Neurology*, 54(6), 1324-1331. <https://doi.org/10.1212/WNL.54.6.1324>
- Fink, G. R., Marshall, J. C., Weiss, P. H., & Zilles, K. (2001). The neural basis of vertical and horizontal line bisection judgments: an fMRI study of normal volunteers. *Neuroimage*, 14(1), S59-S67. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0819>
- Fox, E., Russo, R., Bowles, R., & Dutton, K. (2001). Do threatening stimuli draw or hold visual attention in subclinical anxiety? *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(4), 681–700. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.4.681>

- Fraisse, P. (1946). Contribution a l'étude du rythme en tant que forme temporelle. *Journal de psychologie normale et pathologique*.
- Fraisse, P. (1948). Etude comparée de la perception et de l'estimation de la durée chez les enfants et les adultes. *Enfance*, 1(3), 199-211.
- Fraisse, P. (1967). *Psychologie du temps*. Presses universitaires de France.  
<http://hdl.handle.net/2042/30484>
- Fredrickson, B. L. (2001). The role of positive emotions in positive psychology: The broaden-and-build theory of positive emotions. *American Psychologist*, 56(3), 218–226.  
<https://doi.org/10.1037/0003-066X.56.3.218>
- Fredrickson, B. L. (2004). The broaden–and–build theory of positive emotions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1449), 1367-1377. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1512>
- Fredrickson, B. L., & Branigan, C. (2005). Positive emotions broaden the scope of attention and thought-action repertoires. *Cognition & emotion*, 19(3), 313-332.  
<https://doi.org/10.1080/02699930441000238>
- Gasper, K., & Clore, G. L. (2002). Attending to the big picture: Mood and global versus local processing of visual information. *Psychological science*, 13(1), 34-40.  
<https://doi.org/10.1111/1467-9280.00406>
- Gatti, E., Calzolari, E., Maggioni, E., & Obrist, M. (2018). Emotional ratings and skin conductance response to visual, auditory and haptic stimuli. *Scientific data*, 5(1), 1-12.  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.120>
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological review*, 84(3), 279. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.3.279>
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of sciences*, 423(1), 52-77.  
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA150031.pdf#page=62>

- Gil, S., & Droit-Volet, S. (2011). "Time flies in the presence of angry faces"... depending on the temporal task used!. *Acta psychologica*, 136(3), 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.12.010>
- Gil, S., & Droit-Volet, S. (2012). Emotional time distortions: the fundamental role of arousal. *Cognition & emotion*, 26(5), 847-862. <https://doi.org/10.1080/02699931.2011.625401>
- Girelli, L., Lucangeli, D., & Butterworth, B. (2000). The development of automaticity in accessing number magnitude. *Journal of experimental child psychology*, 76(2), 104-122. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2564>
- Göbel, S. M., Calabria, M., Farne, A., & Rossetti, Y. (2006). Parietal rTMS distorts the mental number line: simulating 'spatial' neglect in healthy subjects. *Neuropsychologia*, 44(6), 860-868. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.09.007>
- Göbel, S., Walsh, V., & Rushworth, M. F. (2001). The mental number line and the human angular gyrus. *Neuroimage*, 14(6), 1278-1289. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0927>
- Gross, J. J., & Levenson, R. W. (1995). Emotion elicitation using films. *Cognition & emotion*, 9(1), 87-108. <https://doi.org/10.1080/02699939508408966>
- Gu, B. M., van Rijn, H., & Meck, W. H. (2015). Oscillatory multiplexing of neural population codes for interval timing and working memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 48, 160-185. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.10.008>
- Hamamouche, K. A., Niemi, L., & Cordes, S. (2017). Quantifying a threat: Evidence of a numeric processing bias. *Acta Psychologica*, 177, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.04.001>
- Hamann, S. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in cognitive sciences*, 5(9), 394-400. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01707-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01707-1)
- Harrington, D. L., Haaland, K. Y., & Hermanowitz, N. (1998). Temporal processing in the basal ganglia. *Neuropsychology*, 12(1), 3. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.12.1.3>
- Hartje, W. (1987). Lateralisiertes Training nichtverbaler kognitiver Fähigkeiten bei aphasischen Patienten. In *Neuroimmunologie Spinale Krankheiten Neuropsychologie*

*Metabolische Enzephalopathien Neurologische Notfälle Interventionelle Neuroradiologie* (pp. 205-209). Springer, Berlin, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-83201-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-642-83201-7_44)

Harvey, M., Milner, A. D., & Roberts, R. C. (1995). Differential effects of line length on bisection judgements in hemispatial neglect. *Cortex*, 31(4), 711-722.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(13\)80022-6](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(13)80022-6)

Haspelmath, M. (1997). *From space to time*. Lincom.  
[https://www.eva.mpg.de/fileadmin/content\\_files/staff/haspelmt/pdf/SpaceTime.pdf](https://www.eva.mpg.de/fileadmin/content_files/staff/haspelmt/pdf/SpaceTime.pdf)

Hayashi, M. J., Kanai, R., Tanabe, H. C., Yoshida, Y., Carlson, S., Walsh, V., & Sadato, N. (2013). Interaction of numerosity and time in prefrontal and parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33(3), 883-893. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6257-11.2013>

Helson, H., & King, S. M. (1931). The tau effect: an example of psychological relativity. *Journal of Experimental Psychology*, 14(3), 202–217.  
<https://doi.org/10.1037/h0071164>

Henik, A., & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: The relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory & cognition*, 10(4), 389-395.  
<https://doi.org/10.3758/BF03202431>

Henmon, V. A. (1906). The Detection of Color-Blindness. *The Journal of Philosophy, Psychology and Scientific Methods*, 341-344. <https://doi.org/10.2307/2011870>

Henry, M. J., & McAuley, J. D. (2009). Evaluation of an imputed pitch velocity model of the auditory kappa effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(2), 551 –564. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.35.2.551>

Henry, M. J., McAuley, J. D., & Zaleha, M. (2009). Evaluation of an imputed pitch velocity model of the auditory tau effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(6), 1399-1413. <https://doi.org/10.3758/APP.71.6.1399>

- Henschen, S. E. (1919). Über sprach-, musik- und rechenmechanismen und ihre lokalisationen im großhirn. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie*, 52(1), 273-298. <https://doi.org/10.1007/BF02872428>
- Heuer, F., & Reisberg, D. (1992). Emotion, arousal, and memory for detail. In S.-Å. Christianson (Ed.), *The handbook of emotion and memory: Research and theory* (pp. 151–180). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Hockey, G. R. J., John Maule, A., Clough, P. J., & Bdzola, L. (2000). Effects of negative mood states on risk in everyday decision making. *Cognition & Emotion*, 14(6), 823-855. <https://doi.org/10.1080/02699930050156654>
- Hoffmann, E. R., & Mortimer, R. G. (1994). Drivers' estimates of time to collision. *Accident Analysis & Prevention*, 26(4), 511-520. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90042-6)
- Holloway, I. D., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of experimental child psychology*, 103(1), 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.001>
- Homma, C. T., & Ashida, H. (2015). What makes space-time interactions in human vision asymmetrical? *Frontiers in psychology*, 6, 756. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00756>
- Homma, C. T., & Ashida, H. (2019). Temporal cognition can affect spatial cognition more than vice versa: The effect of task-related stimulus saliency. *Multisensory research*, 32(1), 25-44. <https://doi.org/10.1163/22134808-20181287>
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6), 435-448. <https://doi.org/10.1038/nrn1684>
- Hurewitz, F., Gelman, R., & Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(51), 19599-19604. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609485103>

- Hurks, P. P., & van Loosbroek, E. (2014). Time estimation deficits in childhood mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities, 47*(5), 450-461. <https://doi.org/10.1177/0022219412468161>
- Irving-Bell, L., Small, M., & Cowey, A. (1999). A distortion of perceived space in patients with right-hemisphere lesions and visual hemineglect. *Neuropsychologia, 37*(8), 919-925. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00147-X)
- Ishihara, M., Keller, P. E., Rossetti, Y., & Prinz, W. (2007). Spatial representations of time: Evidence for the spatial-temporal association of response codes. In *Proceedings of the 15th Meeting of the European Society for Cognitive Psychology* (pp. 119). Leiden, NL: European Society for Cognitive Psychology. <http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0010-F2E8-C>
- Ishihara, M., Keller, P. E., Rossetti, Y., & Prinz, W. (2008). Horizontal spatial representations of time: Evidence for the STEARC effect. *Cortex, 44*(4), 454-461. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.010>
- Izard, C. E. (1977). Differential emotions theory. In *Human emotions* (pp. 43-66). Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2209-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2209-0_3)
- Javadi, A. H., & Aichelburg, C. (2012). When time and numerosity interfere: the longer the more, and the more the longer. *PloS one, 7*(7), e41496. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041496>
- Jones, C. R., Rosenkranz, K., Rothwell, J. C., & Jahanshahi, M. (2004). The right dorsolateral prefrontal cortex is essential in time reproduction: an investigation with repetitive transcranial magnetic stimulation. *Experimental Brain Research, 158*(3), 366-372. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-1912-3>
- Joormann, J., Levens, S. M., & Gotlib, I. H. (2011). Sticky thoughts: Depression and rumination are associated with difficulties manipulating emotional material in working memory. *Psychological science, 22*(8), 979-983. <https://doi.org/10.1177/0956797611415539>

- Kaplan, R., & Kaplan, S. (1969). The arousal-retention interval interaction revisited: The effects of some procedural changes. *Psychonomic Science*, *15*(2), 84-85. <https://doi.org/10.3758/BF03336212>
- Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Delazer, M., Siedentopf, C., Rhomberg, P., Golaszewski, S., Felber, S., & Ischebeck, A. (2005). Neural correlates of distance and congruity effects in a numerical Stroop task: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, *25*(3), 888-898. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.041>
- Kemper, T. D. (1987). How many emotions are there? Wedding the social and the autonomic components. *American journal of Sociology*, *93*(2), 263-289. <https://doi.org/10.1086/228745>
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2003). Effect of Negative Emotional Content on Working Memory and Long-Term Memory. *Emotion*, *3*(4), 378-393. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.3.4.378>
- Kiesel, A., & Vierck, E. (2009). SNARC-like congruency based on number magnitude and response duration. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*(1), 275-279. <https://doi.org/10.1037/a0013737>
- Kleinsmith, L. J., & Kaplan, S. (1963). Paired-associate learning as a function of arousal and interpolated interval. *Journal of experimental psychology*, *65*(2), 190-193. <https://doi.org/10.1037/h0040288>.
- Koch, G., Oliveri, M., Torriero, S., & Caltagirone, C. (2003). Underestimation of time perception after repetitive transcranial magnetic stimulation. *Neurology*, *60*(11), 1844-1846. <https://doi.org/10.1212/WNL.60.11.1844>
- Koch, G., Oliveri, M., Torriero, S., Salerno, S., Gerfo, E. L., & Caltagirone, C. (2007). Repetitive TMS of cerebellum interferes with millisecond time processing. *Experimental brain research*, *179*(2), 291-299. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0791-1>

- Konkle, T., & Oliva, A. (2012). A familiar-size Stroop effect: real-world size is an automatic property of object representation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(3), 561. <https://doi.org/10.1037/a0028294>
- Konkle, T., & Oliva, A. (2012). A real-world size organization of object responses in occipitotemporal cortex. *Neuron*, 74(6), 1114-1124. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.04.036>
- Lake, J. I. (2016). Recent advances in understanding emotion-driven temporal distortions. *Current opinion in behavioral sciences*, 8, 214-219. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.009>
- Lake, J. I., & Meck, W. H. (2013). Differential effects of amphetamine and haloperidol on temporal reproduction: dopaminergic regulation of attention and clock speed. *Neuropsychologia*, 51(2), 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.09.014>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago and London: The University of Chicago Press. <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/M/bo3637992.html>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the flesh: The embodied mind and its challenge to western thought* (Vol. 640). New York: Basic books. [https://doi.org/10.1016/S0378-2166\(02\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0378-2166(02)00058-9)
- Lakoff, G., & Núñez, R. (2000). *Where mathematics comes from* (Vol. 6). New York: Basic Books. [https://pages.ucsd.edu/~rnunez/COGS252\\_Readings/Preface\\_Intro.PDF](https://pages.ucsd.edu/~rnunez/COGS252_Readings/Preface_Intro.PDF)
- Lambrechts, A., Walsh, V., & van Wassenhove, V. (2013). Evidence accumulation in the magnitude system. *PloS one*, 8(12), e82122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082122>
- Lang, P. J. (2005). International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual. *Technical report*. [https://doi.org/10.1016/S0005-7967\(98\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0005-7967(98)00158-2)

- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. *NIMH Center for the Study of Emotion and Attention*, 1(39-58), 3. <https://www2.unifesp.br/dpsicobio/adap/instructions.pdf>
- LeBlanc, V. R., McConnell, M. M., & Monteiro, S. D. (2015). Predictable chaos: a review of the effects of emotions on attention, memory and decision making. *Advances in Health Sciences Education*, 20(1), 265-282. <https://doi.org/10.1007/s10459-014-9516-6>
- Lee, K. H., Egleston, P. N., Brown, W. H., Gregory, A. N., Barker, A. T., & Woodruff, P. W. (2007). The role of the cerebellum in subsecond time perception: evidence from repetitive transcranial magnetic stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(1), 147-157. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.1.147>
- Leibovich, T., Katzin, N., Harel, M., & Henik, A. (2017). From “sense of number” to “sense of magnitude”: The role of continuous magnitudes in numerical cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 40. <https://doi.org/10.1017/S0140525X16000960>
- Lejeune, H., Maquet, P., Bonnet, M., Casini, L., Ferrara, A., Macar, F., Pouthas, V., Timsit-Berthier, M., & Vidal, F. (1997). The basic pattern of activation in motor and sensory temporal tasks: positron emission tomography data. *Neuroscience letters*, 235(1-2), 21-24. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(97\)00698-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(97)00698-8)
- Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: Dissociable systems. *Neuropsychologia*, 41(14), 1942-1958. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(03\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(03)00123-4)
- Leon, M. I., & Shadlen, M. N. (2003). Representation of time by neurons in the posterior parietal cortex of the macaque. *Neuron*, 38(2), 317-327. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00185-5](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00185-5)
- Lewis, E. A., Zax, A., & Cordes, S. (2018). The impact of emotion on numerical estimation: a developmental perspective. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(6), 1300-1311. <https://doi.org/10.1080/17470218.2017.1318154>

Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2013). Is approximate number precision a stable predictor of math ability? *Learning and individual differences*, 25, 126-133.  
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.02.001>

- Lindemann, O., Abolafia, J. M., Girardi, G., & Bekkering, H. (2007). Getting a grip on numbers: numerical magnitude priming in object grasping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(6), 1400. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1400>
- Lindsay, D. S., Read, J. D., & Sharma, K. (1998). Accuracy and confidence in person identification: The relationship is strong when witnessing conditions vary widely. *Psychological Science*, 9(3), 215-218. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00041>
- Link, S. W. (1992). *The wave theory of difference and similarity*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. <https://doi.org/10.1201/9780429054709>
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of number sense: Large-number discrimination in human infants. *Psychological science*, 14(5), 396-401. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.01453>
- Lodinger, N. R., & DeLucia, P. R. (2019). Does automated driving affect time-to-collision judgments? *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 64, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.04.025>
- Loeffler, J., Cañal-Bruland, R., Schroeger, A., Tolentino-Castro, J. W., & Raab, M. (2018). Interrelations between temporal and spatial cognition: The role of modality-specific processing. *Frontiers in psychology*, 9, 2609. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02609>
- Loftus, E. F., Loftus, G. R., & Messo, J. (1987). Some facts about “weapon focus”. *Law and human behavior*, 11(1), 55-62. <https://doi.org/10.1007/BF01044839>
- López-Benítez, R., Coll-Martín, T., Carretero-Dios, H., Lupiáñez, J., & Acosta, A. (2020). Trait cheerfulness sensitivity to positive and negative affective states. *Humor*, 33(3), 467-484. <https://doi.org/10.1515/humor-2018-0028>
- Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2010). General magnitude representation in human infants. *Psychological Science*, 21(6), 873-881. <https://doi.org/10.1177/0956797610370158>

- Lourenco, S. F., Ayzenberg, V., & Lyu, J. (2016). A general magnitude system in human adults: Evidence from a subliminal priming paradigm. *Cortex*, *81*, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.013>
- Lui, M. A., Penney, T. B., & Schirmer, A. (2011). Emotion effects on timing: attention versus pacemaker accounts. *PloS one*, *6*(7), e21829. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021829>
- Malapani, C., Deweer, B., & Gibbon, J. (2002). Separating storage from retrieval dysfunction of temporal memory in Parkinson's disease. *Journal of cognitive Neuroscience*, *14*(2), 311-322. <https://doi.org/10.1162/089892902317236920>
- Malapani, C., Rakitin, B., Levy, R., Meck, W. H., Deweer, B., Dubois, B., & Gibbon, J. (1998). Coupled temporal memories in Parkinson's disease: a dopamine-related dysfunction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*(3), 316-331. <https://doi.org/10.1162/089892998562762>
- Mammarella, N., Borella, E., Carretti, B., Leonardi, G., & Fairfield, B. (2013). Examining an emotion enhancement effect in working memory: Evidence from age-related differences. *Neuropsychological rehabilitation*, *23*(3), 416-428. <https://doi.org/10.1080/09602011.2013.775065>
- Maquet, P., Lejeune, H., Pouthas, V., Bonnet, M., Casini, L., Macar, F., Timsit-Berthier, M., Vidal, F., Ferrara, A., Degueldre, C., Quaglia, L., Delfiore, G., Luxen, A., Woods, R., Mazziotta, J.C., & Comar, D. (1996). Brain activation induced by estimation of duration: a PET study. *Neuroimage*, *3*(2), 119-126. <https://doi.org/10.1006/nimg.1996.0014>
- Marshall, J. C., & Halligan, P. W. (1989). When right goes left: an investigation of line bisection in a case of visual neglect. *Cortex*, *25*(3), 503-515. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(89\)80065-6](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(89)80065-6)
- Martin, B., Wiener, M., & van Wassenhove, V. (2017). A Bayesian perspective on accumulation in the magnitude system. *Scientific reports*, *7*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00680-0>

- Martin, M. A., & Metha, A. (1997). Recall of early childhood memories through musical mood induction. *The Arts in Psychotherapy*, 24(5), 447–454. [https://doi.org/10.1016/S0197-4556\(97\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0197-4556(97)00020-8)
- Matell, M. S., & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *Bioessays*, 22(1), 94-103. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-1878\(200001\)22:1<94::AID-BIES14>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-1878(200001)22:1<94::AID-BIES14>3.0.CO;2-E)
- Matell, M. S., & Meck, W. H. (2004). Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes. *Cognitive brain research*, 21(2), 139-170. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.06.012>
- Matlock, T., Holmes, K. J., Srinivasan, M., & Ramscar, M. (2011). Even abstract motion influences the understanding of time. *Metaphor and Symbol*, 26(4), 260-271. <https://doi.org/10.1080/10926488.2011.609065>
- Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2016). Temporal cognition: Connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological Bulletin*, 142(8), 865-907. <http://dx.doi.org/10.1037/bul0000045>
- McComb, K., Packer, C., & Pusey, A. (1994). Roaring and numerical assessment in contests between groups of female lions, *Panthera leo*. *Animal Behaviour*, 47(2), 379-387. <https://doi.org/10.1006/anbe.1994.1052>
- McGaugh, J. L. (2000). Memory--a century of consolidation. *Science*, 287(5451), 248-251. <https://doi.org/10.1126/science.287.5451.248>
- McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, 12(4), 417-423. <https://doi.org/10.1068/p120417>
- Meck, W. H. (2005). Neuropsychology of timing and time perception. *Brain and cognition*, 58(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.09.004>
- Meck, W. H., & Church, R. M. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of experimental psychology: animal behavior processes*, 9(3), 320. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.9.3.320>

- Ménard, M., Richard, P., Hamdi, H., Daucé, B., & Yamaguchi, T. (2015, February). Emotion Recognition based on Heart Rate and Skin Conductance. In *PhyCS* (pp. 26-32). <https://www.scitepress.org/papers/2015/52411/52411.pdf>
- Merchant, H., Luciana, M., Hooper, C., Majestic, S., & Tuite, P. (2008). Interval timing and Parkinson's disease: heterogeneity in temporal performance. *Experimental Brain Research*, *184*(2), 233-248. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1097-7>
- Merritt, D. J., Casasanto, D., & Brannon, E. M. (2010). Do monkeys think in metaphors? Representations of space and time in monkeys and humans. *Cognition*, *117*(2), 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.08.011>
- Mikels, J. A., Fredrickson, B. L., Larkin, G. R., Lindberg, C. M., Maglio, S. J., & Reuter-Lorenz, P. A. (2005). Emotional category data on images from the International Affective Picture System. *Behavior research methods*, *37*(4), 626-630. <https://doi.org/10.3758/BF03192732>
- Mikels, J. A., Reuter-Lorenz, P. A., Beyer, J. A., & Fredrickson, B. L. (2008). Emotion and working memory: Evidence for domain-specific processes for affective maintenance. *Emotion*, *8*(2), 256–266. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.8.2.256>
- Milner, A. D., & Harvey, M. (1995). Distortion of size perception in visuospatial neglect. *Current Biology*, *5*(1), 85-89. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(95\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(95)00020-0)
- Mogg, K., & Bradley, B. P. (1999). Some methodological issues in assessing attentional biases for threatening faces in anxiety: A replication study using a modified version of the probe detection task. *Behaviour research and therapy*, *37*(6), 595-604.
- Monnier, C., & Syssau, A. (2008). Semantic contribution to verbal short-term memory: Are pleasant words easier to remember than neutral words in serial recall and serial recognition? *Memory & Cognition*, *36*(1), 35-42. <https://doi.org/10.3758/MC.36.1.35>
- Moretto, G., & Di Pellegrino, G. (2008). Grasping numbers. *Experimental brain research*, *188*(4), 505-515. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1386-9>

- Most, S. B., Chun, M. M., Widders, D. M., & Zald, D. H. (2005). Attentional rubbernecking: Cognitive control and personality in emotion-induced blindness. *Psychonomic bulletin & review*, *12*(4), 654-661. <https://doi.org/10.3758/BF03196754>
- Muller, T., & Nobre, A. C. (2014). Flow of time: perceiving the passage of time: neural possibilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1326*(1), 60. <https://dx.doi.org/10.1111%2Fnyas.12545>
- Muller-Lyer, F. C. (1889). Optische urteilstauschungen. *Archiv fur Anatomie und Physiologie, Physiologische Abteilung*, *2*, 263-270.
- Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M. P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, *115*(1), 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.006>
- Nakasone, A., Prendinger, H., & Ishizuka, M. (2005, September). Emotion recognition from electromyography and skin conductance. In *Proc. of the 5th international workshop on biosignal interpretation* (pp. 219-222). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.104.4937&rep=rep1&type=pdf>
- Niedenthal, P. M., & Setterlund, M. B. (1994). Emotion congruence in perception. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *20*(4), 401-411. <https://doi.org/10.1177/0146167294204007>
- Nieder, A., Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, *297*(5587), 1708-1711. <https://doi.org/10.1126/science.1072493>
- Odic, D., & Starr, A. (2018). An introduction to the approximate number system. *Child development perspectives*, *12*(4), 223-229. <https://doi.org/10.1111/cdep.12288>
- Odic, D., Lisboa, J. V., Eisinger, R., Olivera, M. G., Maiche, A., & Halberda, J. (2016). Approximate number and approximate time discrimination each correlate with school math abilities in young children. *Acta Psychologica*, *163*, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.10.010>

- Öhman, A., Flykt, A., & Esteves, F. (2001). Emotion drives attention: Detecting the snake in the grass. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(3), 466–478. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.3.466>
- Oliveri, M., Koch, G., & Caltagirone, C. (2009). Spatial–temporal interactions in the human brain. *Experimental Brain Research*, *195*(4), 489–497. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1834-1>
- Onoe, H., Komori, M., Onoe, K., Takechi, H., Tsukada, H., & Watanabe, Y. (2001). Cortical networks recruited for time perception: a monkey positron emission tomography (PET) study. *Neuroimage*, *13*(1), 37–45. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0670>
- Pacheco-Unguetti, A. P., Acosta, A., & Lupiáñez, J. (2014). Recognizing the bank robber and spotting the difference: emotional state and global vs. local attentional set. *The Spanish journal of psychology*, *17*. <https://doi.org/10.1017/sjp.2014.32>
- Pacheco-Unguetti, A. P., Acosta, A., Callejas, A., & Lupiáñez, J. (2010). Attention and anxiety: Different attentional functioning under state and trait anxiety. *Psychological science*, *21*(2), 298–304. <https://doi.org/10.1177/0956797609359624>
- Pardo-Vazquez, J. L., Castiñeiras-de Saa, J. R., Valente, M., Damião, I., Costa, T., Vicente, M. I., Mendonça, A. G., Mainen, Z. F., & Renart, A. (2019). The mechanistic foundation of Weber’s law. *Nature neuroscience*, *22*(9), 1493–1502. <https://doi.org/10.1038/s41593-019-0439-7>
- Parkinson, C., Liu, S., & Wheatley, T. (2014). A common cortical metric for spatial, temporal, and social distance. *Journal of Neuroscience*, *34*(5), 1979–1987. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2159-13.2014>
- Pêcher, C., Lemerrier, C., & Cellier, J. M. (2011). The influence of emotions on driving behaviour. *Traffic psychology: An international perspective*, 145–158. [https://www.researchgate.net/profile/Celine-Lemerrier/publication/263124950\\_The\\_Influence\\_of\\_Emotions\\_on\\_Driving\\_Behavior/links/557942e408ae75215870430b/The-Influence-of-Emotions-on-Driving-Behavior.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Celine-Lemerrier/publication/263124950_The_Influence_of_Emotions_on_Driving_Behavior/links/557942e408ae75215870430b/The-Influence-of-Emotions-on-Driving-Behavior.pdf)

- Pêcher, C., Lemerrier, C., & Cellier, J.-M. (2009). Emotions drive attention: Effects on driver's behaviour. *Safety Science*, 47(9), 1254–1259. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.03.011>
- Perrot, A., Maillot, P., & Hartley, A. (2019). Cognitive training game versus action videogame: effects on cognitive functions in older adults. *Games for health journal*, 8(1), 35-40. <https://doi.org/10.1089/g4h.2018.0010>
- Pesenti, M., Thioux, M., Seron, X., & De Volder, A. (2000). Neuroanatomical substrates of Arabic number processing, numerical comparison, and simple addition: A PET study. *Journal of cognitive neuroscience*, 12(3), 461-479. <https://doi.org/10.1162/089892900562273>
- Petrušić, W. M. (1992). Semantic congruity effects and theories of the comparison process. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(4), 962. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.18.4.962>
- Phelps, E. A. (2006). Emotion and cognition: insights from studies of the human amygdala. *Annual Review of Psychology*, 57, 27-53. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.56.091103.070234>
- Piazza, M., Mechelli, A., Price, C. J., & Butterworth, B. (2006). Exact and approximate judgements of visual and auditory numerosity: An fMRI study. *Brain research*, 1106(1), 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.05.104>
- Pinel, P., Le Clec'H, G., Van de Moortele, P. F., Naccache, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (1999). Event-related fMRI analysis of the cerebral circuit for number comparison. *Neuroreport*, 10(7), 1473-1479. <https://doi.org/10.1097/00001756-199905140-00015>
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6), 983-993. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00107-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00107-2)
- Piolat, A., & Bannour, R. (2008). Emotions et affects: contribution de la psychologie cognitive. *Le sujet des émotions au Moyen Age*, 53-84. <https://centrepsyche-amu.fr/wp-content/uploads/2014/01/Piolat-Bannour-2008-Beauchesne.pdf>

- Polk, T. A., Reed, C. L., Keenan, J. M., Hogarth, P., & Anderson, C. A. (2001). A dissociation between symbolic number knowledge and analogue magnitude information. *Brain and Cognition*, 47(3), 545-563. <https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1486>
- Pouthas, V., & Perbal, S. (2004). Time perception depends on accurate clock mechanisms as well as unimpaired attention and memory processes. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64(3), 367-386. <https://www.ane.pl/pdf/6434.pdf>
- Pouthas, V., George, N., Poline, J. B., Pfeuty, M., VandeMoorteele, P. F., Hugueville, L., Ferrandez, A. M., Lehericy, S., LeBihan, D., & Renault, B. (2005). Neural network involved in time perception: an fMRI study comparing long and short interval estimation. *Human brain mapping*, 25(4), 433-441. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/hbm.20126>
- Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17(24), R1042-R1043. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.10.013>
- Price-Williams, D. R. (1954). The kappa effect. *Nature*, 173(4399), 363-364. <https://doi.org/10.1038/173363a0>
- Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence: A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological Bulletin*, 132(3), 416-442. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.416>
- Proffitt, D. R., & Linkenauger, S. A. (2013). Perception viewed as a phenotypic expression. *Action science: Foundations of an emerging discipline*, 171.
- Rao, S. M., Mayer, A. R., & Harrington, D. L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature neuroscience*, 4(3), 317-323. <https://doi.org/10.1038/85191>
- Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86(3), 446-461. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.3.446>

- Realì, F., Lleras, M., & Alviar, C. (2019). Asymmetrical time and space interference in Tau and Kappa effects. *Cogent Psychology*, 6(1), 1568069. <https://doi.org/10.1080/23311908.2019.1568069>
- Reisberg, D., & Heuer, F. (2004). Memory for Emotional Events. In D. Reisberg & P. Hertel (Eds.), *Memory and emotion* (pp. 3–41). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195158564.003.0001>
- Ricard, M. (2011). *Plaidoyer pour le bonheur*. Nil.
- Rimé, B. (2009). *Le partage social des émotions*. Presses universitaires de France. <https://doi.org/10.4000/questionsdecommunication.7430>
- Rottenberg, J., Gross, J. J., Wilhelm, F. H., Najmi, S., & Gotlib, I. H. (2002). Crying threshold and intensity in major depressive disorder. *Journal of Abnormal Psychology*, 111(2), 302–312. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.111.2.302>
- Sahaï, A., Labeye, E., Caroux, L., & Lemercier, C. (2021, July). Enhancing child, young and older adult pedestrians' crossing decision presenting vehicle's state information through an external vehicle display. In *12th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics-AHFE 2021*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03128807>
- Sandrini, M., & Rusconi, E. (2009). A brain for numbers. *Cortex*, 45(7), 796-803. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.09.002>
- Sanz, J. (2001). SCALE FOR MOOD ASSESSMENT (EVEA). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.722.5669&rep=rep1&type=pdf>
- Schnall, S., Zadra, J. R., & Proffitt, D. R. (2010). Direct evidence for the economy of action: Glucose and the perception of geographical slant. *Perception*, 39(4), 464-482. <https://doi.org/10.1068/p6445>

- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime: User's Guide. Reference Guide. Getting Started Guide*. Psychology Software Tools, Incorporated. <https://psy.swan.ac.uk/staff/lucignoli/E-Prime/GettingStartedGuideV2.pdf>
- Schubotz, R. I., Friederici, A. D., & Von Cramon, D. Y. (2000). Time perception and motor timing: a common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *Neuroimage*, *11*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0514>
- Schwarz, W., & Heinze, H. J. (1998). On the interaction of numerical and size information in digit comparison: A behavioral and event-related potential study. *Neuropsychologia*, *36*(11), 1167-1179. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00001-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00001-3)
- Schwarz, W., & Ischebeck, A. (2003). On the relative speed account of number-size interference in comparative judgments of numerals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*(3), 507-522. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.3.507>
- Schweizer, S., & Dalgleish, T. (2016). The impact of affective contexts on working memory capacity in healthy populations and in individuals with PTSD. *Emotion*, *16*(1), 16-23. <https://doi.org/10.1037/emo0000072>
- Shen, M., Xie, J., Liu, W., Lin, W., Chen, Z., Marmolejo-Ramos, F., & Wang, R. (2016). Interplay between the object and its symbol: the size-congruency effect. *Advances in cognitive psychology*, *12*(2), 115. <https://dx.doi.org/10.5709%2Faccp-0191-7>
- Simen, P., Vlasov, K., & Papadakis, S. (2016). Scale (in) variance in a unified diffusion model of decision making and timing. *Psychological Review*, *123*(2), 151-181. <https://doi.org/10.1037/rev0000014>
- Simon, O., Mangin, J. F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, *33*(3), 475-487. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(02\)00575-5](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(02)00575-5)
- Smith, S. D., Most, S. B., Newsome, L. A., & Zald, D. H. (2006). An emotion-induced attentional blink elicited by aversively conditioned stimuli. *Emotion*, *6*(3), 523-527. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.3.523>

- Srinivasan, M., & Carey, S. (2010). The long and the short of it: On the nature and origin of functional overlap between representations of space and time. *Cognition*, *116*(2), 217-241. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.05.005>
- Starr, A., & Brannon, E. M. (2016). Visuospatial working memory influences the interaction between space and time. *Psychonomic bulletin & review*, *23*(6), 1839-1845. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1043-4>
- Starr, A., Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2013). Number sense in infancy predicts mathematical abilities in childhood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(45), 18116-18120. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302751110>
- Syssau, A., & Monnier, C. (2012). L'influence de la valence émotionnelle positive des mots sur la mémoire des enfants. *Psychologie française*, *57*(4), 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2012.09.003>
- Takayama, Y., Sugishita, M., Akiguchi, I., & Kimura, J. (1994). Isolated acalculia due to left parietal lesion. *Archives of Neurology*, *51*(3), 286-291. <https://doi.org/10.1001/archneur.1994.00540150084021>
- Taylor, J. E. T., Witt, J. K., & Sugovic, M. (2011). When walls are no longer barriers: Perception of wall height in parkour. *Perception*, *40*(6), 757-760. <https://doi.org/10.1068/p6855>
- Tipples, J. (2008). Negative emotionality influences the effects of emotion on time perception. *Emotion*, *8*(1), 127-131. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.8.1.127>
- Traugott, E. C. (1978). In JH Greenberg, On the expression of spatiotemporal relations in language, Word structure, Universals of human language, vol. 3.
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock". *Psychological Monographs: General and Applied*, *77*(13), 1-31. <https://doi.org/10.1037/h0093864>

- Tzelgov, J., Meyer, J., & Henik, A. (1992). Automatic and intentional processing of numerical information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(1), 166–179. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.18.1.166>
- Vagnoni, E., Andreanidou, V., Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2017). Action ability modulates time-to-collision judgments. *Experimental brain research*, 235(9), 2729-2739. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5008-2>
- Van der Horst & Hogema, "Time-to-collision and collision avoidance systems", *Proc. 6th ICTCT Workshop Safety Evaluation of Traffic Systems: Traffic Conflicts and Other Measures*, pp. 109-121, 1993. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.511.3548&rep=rep1&type=pdf>
- Van Marle, K., & Wynn, K. (2006). Quantitative reasoning. *Encyclopedia of Cognitive Science*. <https://doi.org/10.1002/0470018860.s00602>
- Van Marle, K., Chu, F. W., Li, Y., & Geary, D. C. (2014). Acuity of the approximate number system and preschoolers' quantitative development. *Developmental science*, 17(4), 492-505. <https://doi.org/10.1111/desc.12143>
- Vicario, C. M., Rappo, G., Pepi, A., Pavan, A., & Martino, D. (2012). Temporal abnormalities in children with developmental dyscalculia. *Developmental Neuropsychology*, 37(7), 636-652. <https://doi.org/10.1080/87565641.2012.702827>
- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L., & Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition & Emotion*, 22(4), 720-752.
- Vierordt, K. (1868). *Der zeitsinn nach versuchen*. H. Laupp.
- Vincent, S. B. (1912). *The Functions of the Vibrissae in the Behavior of the White Rat*. (Vol. 1, No. 5). University of Chicago.

- Virgo, J., Pillon, J., Navarro, J., Reynaud, E., & Osiurak, F. (2017). Are you sure you're faster when using a cognitive tool? *American Journal of Psychology*, *130*(4), 493-503. <https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.130.4.0493>
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in cognitive sciences*, *7*(11), 483-488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>
- Walsh, V., & Pascual-Leone, A. (2003). *Transcranial magnetic stimulation: a neurochronometrics of mind*. MIT press.
- Wang, J. J., Halberda, J., & Feigenson, L. (2017). Approximate number sense correlates with math performance in gifted adolescents. *Acta psychologica*, *176*, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.03.014>
- Warrington, E. K., & James, M. (1967). Tachistoscopic number estimation in patients with unilateral cerebral lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *30*(5), 468. <https://dx.doi.org/10.1136%2Fjnnp.30.5.468>
- Wearden, J. H. (1991). Do humans possess an internal clock with scalar timing properties? *Learning and motivation*, *22*(1-2), 59-83. [https://doi.org/10.1016/0023-9690\(91\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0023-9690(91)90017-3)
- Wearden, J. H. (1991). Human performance on an analogue of an interval bisection task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, *43*(1b), 59-81. <https://doi.org/10.1080/14640749108401259>
- Wearden, J. H. (1992). Temporal generalization in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *18*(2), 134. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.18.2.134>
- White, E., Shockley, K., & Riley, M. A. (2013). Multimodally specified energy expenditure and action-based distance judgments. *Psychonomic bulletin & review*, *20*(6), 1371-1377. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0462-8>

- Wiem, M. B. H., & Lachiri, Z. (2017). Emotion classification in arousal valence model using MAHNOB-HCI database. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(3).  
<https://pdfs.semanticscholar.org/3750/b635d455fee489305b24ead4b7e9233b7209.pdf>
- Witt, J. K., & Proffitt, D. R. (2005). See the ball, hit the ball: Apparent ball size is correlated with batting average. *Psychological Science*, 16(12), 937–938.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01640.x>
- Witt, J. K., & Proffitt, D. R. (2008). Action-specific influences on distance perception: A role for motor simulation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(6), 1479–1492. <https://doi.org/10.1037/a0010781>
- Witt, J. K., & Sugovic, M. (2010). Performance and ease influence perceived speed. *Perception*, 39(10), 1341-1353. <https://doi.org/10.1068/p6699>
- Witvliet, C. V., & Vrana, S. R. (1996). The emotional impact of instrumental music on affect ratings, facial EMG, autonomic measures, and the startle reflex: Effects of valence and arousal. In *Psychophysiology*, 33(Suppl. 1), 91.
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)
- Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of vision*, 7(10), 2-2. <https://doi.org/10.1167/7.10.2>
- Yang, E., Zald, D. H., & Blake, R. (2007). Fearful expressions gain preferential access to awareness during continuous flash suppression. *Emotion*, 7(4), 882.  
<https://dx.doi.org/10.1037%2F1528-3542.7.4.882>
- Young, L. N., & Cordes, S. (2013). Fewer things, lasting longer: The effects of emotion on quantity judgments. *Psychological science*, 24(6), 1057-1059.  
<https://doi.org/10.1177/0956797612465294>
- Zorzi, M., Priftis, K., & Umiltà, C. (2002). Neglect disrupts the mental number line. *Nature*, 417(6885), 138-139. <https://doi.org/10.1038/417138a>