Un système de magnitude commun pour la perception et l'action : étude des interactions entre la cognition numérique et les paramètres de la saccade oculaire

Alexandra Pressigout

▶ **To cite this version:**

Alexandra Pressigout. Un système de magnitude commun pour la perception et l'action : étude des interactions entre la cognition numérique et les paramètres de la saccade oculaire. Psychologie. Université Paris Cité, 2019. Français. NNT : 2019UNIP5028 . tel-03967875

HAL Id: tel-03967875
https://theses.hal.science/tel-03967875

Submitted on 1 Feb 2023

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.

Université de Paris

École doctorale 261 : Cognition, Comportements, Conduites Humaines

Laboratoire Vision Action Cognition

Un système de magnitude commun pour la perception et l'action :

Étude des interactions entre la cognition numérique et les paramètres de la saccade oculaire

Par **Alexandra PRESSIGOUT**

Thèse de doctorat de Psychologie

Dirigée par **Karine DORÉ-MAZARS**

Soutenance prévue le 21 Novembre 2019

Composition du jury

Arnaud BADETS	Chargé de recherche HDR	Université de Bordeaux	Rapporteur
Anna MONTAGNINI	Chargée de recherche HDR	Aix-Marseille Université	Rapporteure
Maria Dolores DE HEVIA	Chargée de recherche	Université Paris Descartes	Examinatrice
André DIDIERJEAN	Professeur des Universités	Université de Franche-Comté	Examinateur
Alessandro FARNE	Directeur de recherche	Université Lyon 1	Examinateur
Karine DORÉ-MAZARS	Professeure des Universités	Université Paris Descartes	Directrice

Except where otherwise noted, this work is licensed under
https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/fr/

Remerciements

« Un seul mot, usé, mais qui brille comme une vieille pièce de monnaie : merci ! » - P. Neruda

Tout d'abord, je souhaite remercier les rapporteur(e)s de cette thèse, Arnaud Badets et Anna Montagnini, ainsi que les examinateurs(trice), Maria Dolores de Hevia, André Didierjean et Alessandro Farné, de me faire l'honneur d'expertiser mon travail de thèse. Merci pour votre présence et votre temps.

Karine, ma directrice de thèse, ces mots ne suffiront pas pour te remercier. Tu m'as offert la possibilité de réaliser cette thèse, dans des conditions plus que favorables. Tu m'as enseigné la rigueur en me guidant et m'accompagnant pendant ces trois années de thèse. Merci pour ton implication, ta disponibilité et ton enthousiasme qui nous ont permis de réaliser ensemble de beaux travaux. Je suis fière d'avoir été ta doctorante. Je te remercie aussi de m'avoir encouragée à enseigner, cette expérience a été très enrichissante. J'ai sincèrement apprécié le duo que nous formions tant sur le plan professionnel que sur le plan personnel.

Ce projet n'aurait jamais vu le jour sans vous, Karine et Agnès, qui m'avez fait confiance dès le début. Agnès, même si tu n'as pas directement pris part à cette aventure qu'est la thèse, tu m'as suivie du début à la fin et a été d'une grande aide dont je te suis énormément reconnaissante.

Ce parcours, je te le dois aussi Dorine, toi qui m'as accueillie dans le Master PCFA (première promo !) auquel je souhaite une longue vie. Merci pour ta gentillesse et ton empathie. J'espère que nous ferons honneur à cette formation solide, promise à un bel avenir.

Je souhaite remercier du fond du cœur tous les membres du laboratoire VAC, de m'avoir accueillie si gentiment et d'avoir été si bienveillants à mon égard. Je m'estime très chanceuse d'avoir pu partager ces trois années avec vous. Christelle, tout d'abord merci pour ton implication dans mes différents travaux, maître dans l'art de l'Experiment Builder ! Mais aussi, merci de partager avec moi cet amour pour les voyages et pour… R ! Louisa, toujours de bonne humeur, tu as joué le rôle d'une grande sœur. Merci à Anne et toi pour votre relecture minutieuse de la thèse. Céline, j'ai beaucoup apprécié ces moments passés ensemble et notamment le travail avec toi sur ce projet ADSIZE qui portera ses fruits. C'était un plaisir de travailler avec chacune d'entre vous, ainsi qu'avec toi Karima. Patrice, merci pour ces échanges enrichissants. Marine, j'aimerai te garder à mes côtés ! Merci pour ta patience et ton sourire permanent ! Je tiens à exprimer toute mon amitié à tous les autres membres du laboratoire qui ont contribué à rendre cette aventure unique.

Je remercie aussi tous les membres de l'école doctorale. Je suis heureuse d'avoir pu travailler à vos côtés en tant que représentante des doctorants (merci à mes binômes Emilie et Angélique).

Alexandra, tu m'as fait découvrir le monde des doctorants avant l'heure. Merci de m'avoir laissé ton bureau (sûrement le meilleur puisque tout le monde le veut !). Jérôme, tu as perdu une Alexandra pour en retrouver une autre… ! Je te remercie d'être cette personne toujours prête à aider et à l'écoute. Merci pour tes relectures de mes travaux, tes corrections ont été précieuses. Gabriella, ta voix a été précieuse ! Mes « partner in crime », Angélique et Alexandre, nos moments de complicité au quotidien ont été essentiels pour mener à bien mon projet. Je souhaite aussi remercier

Martin, Marla et Katarina, avec qui nous avons partagé ce bureau et plus largement cette belle aventure. Je vais quitter ce bureau mais notre amitié ne se termine pas là. Je tiens aussi à remercier Vanessa, Allan, Philippe, Jean-Charles et les nombreuses belles rencontres qui ont accompagné mes années de thèse. Je vous (ou nous) souhaite à tous une brillante carrière.

Un grand merci à l'ensemble des participants (étudiants, enseignants, amis) qui ont accepté de jouer les cobayes. Je remercie aussi les étudiants de master et de licence qui ont travaillé de près ou de loin sur ce projet de thèse et qui ont contribué aux expériences présentées dans cette thèse. Léo, bonne chance pour la suite.

Pour finir, je tiens à remercier ma famille et mes amis d'avoir été présents, de m'avoir soutenue et supportée pendant ces longues années. Merci pour ces moments de bonheur que vous m'offrez et qui comptent beaucoup. Merci à vous, mon père et ma mère, pour votre amour inconditionnel. J'espère que vous êtes fiers de votre fille. Enfin, Guillaume, quel bonheur de partager mon quotidien avec toi. Merci d'être toi, tout simplement.

Résumé

Les questions théoriques de cette thèse sont construites autour du modèle de Walsh (2003) qui propose un système général de magnitude appelé ATOM (« A Theory Of Magnitude ») traitant les informations liées à l'espace, aux quantités et au temps qui sont indispensables pour comprendre et agir sur notre environnement. Si le rôle déterminant des représentations spatiales, numériques et temporelles dans l'initiation de la réponse motrice est étayé par une littérature très abondante, leur influence sur les paramètres cinématiques de cette réponse est bien moins documenté (axe 1). Au-delà de l'influence de la perception sur l'action prédite par le modèle ATOM, nous proposons d'étudier l'influence de l'action sur la perception de ces magnitudes (axe 2) qui n'est pas abordée dans ce modèle. Pourtant, certaines théories proposent qu'agir sur notre environnement façonne la perception des objets qui nous entourent. L'objectif de cette thèse était d'examiner la place de l'action dans le système commun des magnitudes perceptives dans le système visuo-moteur. Le système saccadique a été utilisé comme modèle du système moteur humain. Dans le premier axe, nous avons montré que les paramètres saccadiques à la fois temporels (i.e. latence) et spatiaux (i.e. amplitude) sont sensibles à une information numérique, bien que cette sensibilité n'émerge que sous certaines conditions. Sur la latence des réponses, nos données ont mis en évidence que les associations spatio-numériques dépendent du temps d'activation de la quantité selon le format de présentation du chiffre (chiffre arabe / mot de chiffre), le temps d'initiation du mouvement selon l'effecteur (œil / main) auxquels s'ajoutent des différences interindividuelles (rapide / lent). Sur les paramètres moteurs des réponses, nous avons montré que l'amplitude est modifiée selon la magnitude d'un chiffre lorsque les participants devaient viser un chiffre (présenté seul ou avec un autre). Cette modification de l'amplitude est plus importante lorsque le système saccadique n'est pas contraint par la présence d'une cible réduisant la variabilité des amplitudes saccadiques. Dans le second axe, l'influence réciproque de l'action sur la perception a été testée. Nous avons utilisé l'adaptation saccadique induite par la répétition du saut intrasaccadique de la cible qui conduit à la recalibration de l'amplitude afin de maintenir la précision de la visée de la saccade. Nous avons montré que l'adaptation en diminution d'amplitude entraîne une modification dans le même sens de la perception de la taille d'un objet (i.e. sous-estimation). La recalibration adaptative de la magnitude motrice semble donc conduire à la recalibration de la magnitude de la taille perçue, suggérant une carte motrice et perceptive commune. Ainsi, nous avons montré que la magnitude motrice avait toute sa place dans le système commun de magnitudes jusqu'alors limité aux dimensions perceptives puisque 1) la perception des magnitudes numériques entraîne des modifications des paramètres à la fois temporels et spatiaux de la saccade oculaire et que 2) des modifications motrices entraînent des changements perceptifs de taille. Les données issues de cette thèse constituent un argument fort en faveur d'un système commun pour les systèmes perceptif et moteur, calibrant leur magnitude l'un par rapport à l'autre.

Abstract

The theoretical issues of the present thesis are derived from the ATOM model ("A Theory Of Magnitude", Walsh, 2003) that posited a generalized magnitude system involved in the processing of spatial, numerical and temporal information used to understand and act on our environment. While a large body of research has considered the key role of the cognitive representation of magnitudes on the initiation time of motor responses, their role on kinematic parameters has received little attention (part 1). Beyond the influence of perception on action predicted by the ATOM model, we set about determining whether action could in turn influence the perception of these magnitudes (part 2). Although this issue was not addressed by the model, some theories suggest that acting on the environment shapes the perception of surrounding objects. The aim of this thesis was to examine the status of action in the generalized magnitude system specialized for perceptual magnitudes. We used the saccadic system as a model of the human visuo-motor system. In the first part, our results show that both temporal (i.e. latency) and spatial (i.e. amplitude) parameters of saccadic responses can be affected by numerical information under certain conditions. Regarding response latency, we found a time-dependency resulting from processing specificities linked to number format (Arabic digit/written word), effector type (eye/hand) and to individual characteristics (fast/slow participants). Regarding motor response parameters, saccade amplitude proves to be modulated by the numerical magnitude of digit targets (displayed alone or with another digit), and is particularly impacted in the absence of a saccadic target increasing amplitude variability. In a second part, the reciprocal influence of action and perception has been tested. The saccadic adaptation induced by the repeated target intrasaccadic step is known to modify saccade amplitude in order to reach the displaced target position more accurately. Using such a protocol, we showed that the decrease in saccadic amplitude leads to a decrease in the perceived size of visual objects. The recalibration of motor magnitude seems to induce a recalibration of the perceived object size. These results suggest that motor and perceptual representations share a common map. To sum up, we assume that action has a major role in the generalized magnitude system originally restricted to perceptual dimensions since 1) perception of numerical magnitude modulates both temporal and spatial parameters of saccadic responses and since 2) motor modifications lead to adjustments of the perceived size. Overall, all the data collected for this thesis bring evidence for a common system used for perceptual and motor systems, adjusting their magnitude over each other.

Valorisation de la thèse

Articles

Pressigout, A., & Dore-Mazars, K. (en préparation). Saccades toward a digit: does numerical magnitude modulate saccadic parameters?

Pressigout, A., & Dore-Mazars, K. (en révision). How does number magnitude influence temporal and spatial parameters of eye movements? *Experimental Brain Research*. EXBR-D-19-00370

Pressigout, A., Paeye, C., & Dore-Mazars, K. (en révision). Saccadic adaptation shapes perceived size: Common codes for action and perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*. PP-ORIG-19-107

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., & Dore-Mazars, K. (2018). Time-dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. *Psychological Research*. 1-11

Résumé des communications parues dans des revues à comité de lecture

Pressigout, A., Paeye, C., Kech, & Doré-Mazars, K. (2019). Saccadic adaptation alters object size perception. Book of abstracts of the 41st European Conference on Visual Perception, 2018 August 26-30, Trieste, Italy. *Perception*, *48*(S1), p.119.

Pressigout, A., Lavergne, L., Mishikina, J., & Doré-Mazars, K. (2017). Number magnitude influences saccade parameters: Evidence from foveal and peripheral processing. European Conference on Visual Perception, 27-31 August 2017, Berlin, Germany. Perception.

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., Fayel, A., & Doré-Mazars, K. (2017). Time-dependency of the SNARC effect on number words: Evidence from saccadic responses. ECEM19, 19th European Conference on Eye Movements, 20-24 August 2017, Wuppertal, Germany. *Journal Of Eye Movement Research*, *10*(6), p.308.

Pressigout, A., Charvillat A, Fayel A, Vitkova V, & Doré-Mazars, K (2016). Does conceptual quantity of words affect the spatial coding of saccade responses, like a SNARC effect? In Book of Abstracts of the 39th ECVP European Conference on Visual Perception, Barcelona, 2016, August 28th-September 1st 2016, Barcelona, Spain. *Perception, 45*(S2), p.21.

Communications dans des colloques nationaux et internationaux avec actes de congres

Pressigout, A., & Doré-Mazars, K. (2019). Does number processing also modulate kinematic parameters of spontaneous saccadic eye movements? 21st Conference of European Society of Cognitive Psychology, 2019, September 25-28, Tenerife, Espagne. [Poster]

Pressigout, A., Paeye, C., Kech, L., & Doré-Mazars, K. (2018). Does saccadic adaptation alter object size perception? 12th GDR Vision Meeting, 2018, October 4-5, Paris, France. [Poster]

Pressigout, A., Paeye, C., Kech, L., & Doré-Mazars, K. (2018). Saccadic adaptation alters object size perception. 41th European Conference on Visual Perception, 26-30 August 2018, Trieste, Italie. [Poster]

Pressigout, A., Lavergne, L., Mishikina, J., & Doré-Mazars, K. (2017). Number magnitude influences saccade parameters: Evidence from foveal and peripheral processing. 40th European Conference on Visual Perception, 27-31 August 2017, Berlin, Germany [Poster]

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., Fayel, A., & Doré-Mazars, K. (2017). Time-dependency of the SNARC effect on number words: Evidence from saccadic responses. ECEM19, 19th European Conference on Eye Movements, 20-24 August 2017, Wuppertal, Germany [Poster]

Pressigout A., Charvillat A., Fayel A., Vitkova V., & Doré-Mazars, K. (2016). Does conceptual quantity of words affect the spatial coding of saccade responses, like a SNARC effect? 39th ECVP European Conference on Visual Perception, 2016, August 28th- September 1st, Barcelona, Spain. [Poster]

Table des matières

Remerciements 3

Résumé 5

Abstract 6

Valorisation de la thèse 7

Table des matières 9

Table des figures 11

Liste des abréviations 12

INTRODUCTION GENERALE 13

UN SYSTEME DE MAGNITUDE GENERALISE 15

1 Les magnitudes mentales 17

1.1 La numérosité 17

1.1.1 Perception des numérosités et « sens du nombre » 17

1.1.1.1 1, 2, 3 … et le reste 19

1.1.1.2 Le Système de Nombre Approximatif (SNA) 20

1.1.1.3 Concept du nombre 23

1.1.2 Représentation spatiale des numérosités 27

1.2 Un sens des magnitudes ? 30

2 Un système commun de magnitude pour la perception des quantités, de l'espace et du temps 33

2.1 Les prédictions du modèle ATOM 33

2.1.1 Hypothèse « plus A - plus B » 34

2.1.2 Modèles explicatifs des associations entre différentes magnitudes et des codes de réponse 38

2.1.3 La perception pour l'action 40

2.2 Le cortex pariétal dans la représentation des magnitudes 41

2.3 La place de l'action dans le modèle ATOM 45

2.3.1 Perception sur Action 45

2.3.2 Action sur Perception 49

LE SYSTEME SACCADIQUE DANS L'ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE PERCEPTION ET ACTION 51

3 La perception visuelle et le système saccadique 53

3.1 Caractéristiques de l'œil et traitement de l'information visuelle 53

3.2 La saccade oculaire 56

3.2.1 La transformation sensori-motrice pour la saccade 58

3.2.2 Modèle fonctionnel de génération des saccades de Findlay et Walker (1999) 59

3.2.2.1 La latence : quand partir ? 61
3.2.2.2 L'amplitude : où aller ? 63

4 La métrique de la saccade oculaire dans l'étude des relations perception/action 67

4.1 Arguments neurophysiologiques 68

4.2 Interactions entre les magnitudes continues et le système oculomoteur 69

4.3 L'amplitude, un paramètre moteur à étudier 72

4.3.1 Ajouter un distracteur : l'effet global 72
4.3.2 Supprimer la cible saccadique 75
4.3.3 Déplacer la cible pendant la saccade : l'adaptation saccadique 76

Objectifs de la thèse 81

CONTRIBUTION EXPERIMENTALE 83

1 Axe 1 : influence du traitement numérique sur la réponse saccadique 86

1.1 Article 1– Time-dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. 88

1.2 Poster 1 – Étude comparative en oculométrie de l'effet SNARC induit par des stimuli linguistiques numériques versus conceptuels 100

1.3 Article 2 – Saccades toward a digit: does numerical magnitude modulate saccadic parameters? 103

1.4 Article 3 – How does number magnitude influence temporal and spatial parameters of eye movements? 124

POINTS-CLES 141

2 Axe 2 : influence des changements moteurs sur la perception 143

2.1 Article 4 – Saccadic adaptation shapes perceived size: Common codes for action and perception. 145

2.2 Etude 5 – l'impact de l'adaptation saccadique sur la perception temporelle 165

POINTS-CLES 167

DISCUSSION 169

Résultats de la thèse 171

Axe 1 : Comment les réponses saccadiques sont impactées par l'information numérique ? 172
Axe 2 : Quelles sont les conséquences perceptives des changements moteurs ? 176

Place de l'action dans le modèle ATOM 180

Ouvertures 183

Existe-il un lien fonctionnel entre les actions et les nombres ? 183
Quel est la place du langage dans les interactions espace-nombre et temps ? 184
Côté marketing, les propriétés numériques influencent-elles notre perception des prix ? 186

CONCLUSION GENERALE 189

Bibliographie 191

Table des figures

Figure 1.1 – Trois systèmes de traitement des numérosités. 19
Figure 1.2 – Illustration de la loi de Weber. 21
Figure 1.3 – Effet de distance. 22
Figure 1.4 – Modèle du triple-code de Dehaene (1992). 23
Figure 1.5 – Régions cérébrales impliquées dans le traitement des nombres. 26
Figure 1.6 – Effet SNARC. 27
Figure 2.1 – Modèle ATOM de Walsh (2003). 34
Figure 2.2 – Illustration d'un essai expérimental de Xuan et al. (2007). 35
Figure 2.3 – Illustration entre les magnitudes perceptives et le côté de l'espace. 37
Figure 2.4 – Schéma expérimental de l'expérience de Lindemann et al., (2007). 40
Figure 2.5 – Activation du cortex pariétal en réponse à différentes magnitudes. 43
Figure 2.6 – Activation cérébrale liée à différentes tâches spécifiques et multitâches. 44
Figure 2.7 – Corrélation entre les magnitudes motrices et les informations spatiales et numériques. 46
Figure 2.8 – Exemple de trajectoire manuelle d'un participant de l'expérience de Song et Nakayama (2008). 48
Figure 3.1 - Répartition des photorécepteurs sur la rétine. 53
Figure 3.2 - Voies du traitement de l'information visuelle. 56
Figure 3.3 - Illustration des paramètres saccadiques. 57
Figure 3.4 - Modèle fonctionnel de génération de saccades de Findlay et Walker (1999). 59
Figure 3.5 - Réseaux neuro-anatomiques des différents types de saccades. 60
Figure 3.6 - Les différents paradigmes expérimentaux modulant la latence saccadique. 62
Figure 3.7 - Effets d'un distracteur et de ses caractéristiques sur les paramètres saccadiques. 65
Figure 4.1 – Effet des saccades sur le traitement numérique. 69
Figure 4.2 - Illustration des associations entre temps et espace. 71
Figure 4.3 – Illustration de la visée d'une cible dans différentes conditions expérimentales. 73
Figure 4.4 – Illustration de l'adaptation saccadique en diminution d'amplitude. 77
Figure 5 – Décours temporel d'un essai expérimental et résultats de l'Etude 5 166

Liste des abréviations

ATOM : théorie de la magnitude (*A Theory Of Magnitude* en anglais)

CMT : théorie de la métaphore conceptuelle (*Conceptual Metaphor Theory* en anglais)

CS : Colliculus Supérieur

hIPS : sillon intra-pariétal horizontal (*horizontal Intra-Parietal Sulcus* en anglais)

IPS : sillon intra-pariétal (*Intra-Parietal Sulcus* en anglais)

IRMf : Imagerie par Résonnance Magnétique fonctionnelle

LMN : Ligne Mentale de Nombres

PES : Point d'Equivalence Subjectif

SNA : Système de Nombre Approximatif

SNARC : Association spatio-numérique de codes de réponses (*Spatial Numerical Association of Response Codes* en anglais)

SQuARC : Association spatio-quantitative de codes de réponses (*Spatial Quantity Association of Response Codes* en anglais)

STEARC : Association spatio-temporelle de codes de réponses (*Spatial Temporal Association of Response Codes* en anglais)

VIP : aire intra-pariétale ventrale (*Ventral Intra-Parietal* en anglais)

V1 : cortex visuel primaire

INTRODUCTION GENERALE

UN SYSTEME DE MAGNITUDE GENERALISE

Notre interaction avec le monde dépend fondamentalement de notre compréhension du temps, de l'espace et des nombres, qui sont des magnitudes représentatives de la quantité à laquelle elles se réfèrent. Elles sont généralement représentées sur un continuum mental permettant de réaliser des opérations de comparaison telles que « plus que » et « moins que ». Une bonne perception de ces magnitudes est indispensable pour comprendre et agir sur notre environnement. Par exemple, la simple tâche de saisir d'un objet requiert l'intégration des dimensions de distance pour localiser et atteindre l'objet, et de taille de l'objet pour adapter la taille de la pince digitale. Une bonne estimation de ces magnitudes conduit à une saisie réussie de l'objet. En revanche, une mauvaise estimation peut avoir des conséquences dramatiques lorsqu'il faut par exemple traverser une route. En effet, cette action nécessite d'évaluer correctement le temps pour atteindre le trottoir opposé, et de prendre en compte la distance et la vitesse des véhicules sur la route.

Dans ce premier chapitre, nous nous intéresserons tout d'abord à la magnitude numérique, une dimension qui est aussi utile pour la survie. D'ailleurs, nos capacités d'estimation de la quantité sont innées et nous les partageons avec d'autres espèces. Par exemple, un animal seul n'entrera pas en compétition avec plusieurs adversaires s'il se sent en infériorité numérique ou si l'adversaire unique est très fort ou très gros relativement à ses propres capacités. Aussi, il se dirigera vers l'endroit où la nourriture est plus abondante. Dans cette partie, nous développerons les différentes théories qui permettent d'expliquer comment l'être humain perçoit les numérosités ainsi que la notion abstraite des chiffres. Les chiffres sont définis comme étant la représentation symbolique de l'information numérique. Ils permettent à eux seuls de décrire l'intensité des autres dimensions perceptives. Chaque dimension physique comme la distance, la luminosité, le temps s'exprime en utilisant des chiffres, se spécifiant par leur unité de mesure. Un grand nombre de chercheurs suggère que ces informations physiques et symboliques de la quantité s'intègrent pour que nous puissions interagir avec notre environnement. Une des grandes questions est de savoir si ces dimensions quantitatives sont traitées indépendamment les unes des autres ou si elles sont imbriquées dans un seul format de représentation généralisé. Un argument en faveur de la deuxième option repose sur la capacité à discriminer ces magnitudes par la même relation mathématique : la loi de Weber. Nous développerons dans un second temps le modèle ATOM (A Theory Of Magnitude) de Walsh (2003) qui propose que ces différentes dimensions partagent un traitement similaire qui aura des conséquences sur l'action. La première partie de l'introduction sera davantage centrée sur les liens entre les dimensions perceptives et l'action, question phare de cette thèse. Le système saccadique, présenté dans la seconde partie, a été utilisé comme modèle du contrôle moteur afin d'étudier les interactions entre perception et action.

1 Les magnitudes mentales

SOMMAIRE

1.1 La numérosité 17

1.1.1 Perception des numérosités et « sens du nombre » 17

1.1.1.1 1, 2, 3 … et le reste 19

1.1.1.2 Le Système de Nombre Approximatif (SNA) 20

1.1.1.3 Concept du nombre 23

1.1.2 Représentation spatiale des numérosités 27

1.2 Un sens des magnitudes ? 30

Acheter une baguette, comparer les prix au supermarché ne sont que des exemples illustrant le fait que de nombreuses activités de notre quotidien requiert l'utilisation des nombres. Ces entités font partie intégrante de notre société et sont à l'origine de nombreux domaines variés tels que l'économie ou l'informatique. La cognition numérique est un champ d'étude qui a pour objet le nombre et on peut dire que ce domaine est aujourd'hui très bien documenté. Certains chercheurs proposent que le nombre seul ne puisse être appréhendé sans les autres dimensions quantitatives qui s'avèrent être souvent corrélées dans le monde dans lequel nous vivons. Si historiquement la question était de comprendre si une même représentation du nombre existait selon sa notation sous forme symbolique (chiffre arabe, chiffre écrit en toutes lettres) ou non-symbolique (e.g. points d'un dé), les chercheurs s'interrogent aujourd'hui sur l'idée d'une représentation qui pourrait être commune aux différentes magnitudes. En effet**, la magnitude est la représentation de la quantité d'une dimension donnée**, pouvant s'appréhender sur un continuum « plus que, moins que ».

Dans un premier temps, les différents modèles de perception des quantités numériques seront développés. Nous présenterons ensuite les données en faveur d'une représentation de la magnitude partagée par plusieurs dimensions, et ce dans le but d'alimenter le débat actuel sur l'information numérique qui est envisagée comme traitée soit de façon spécifique, soit par un système de représentation commun à différents types de magnitude.

1.1 La numérosité

1.1.1 Perception des numérosités et « sens du nombre »

De nombreuses recherches ont montré que nous avons tous cette habileté à percevoir la numérosité, la manipuler et la comprendre (voir Cantlon, Platt, & Brannon, 2009; Dehaene, 2010; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004 pour des revues). La numérosité serait une propriété de

perception basique, qui correspond à une quantité d'éléments présents dans un ensemble. De la même façon que l'on reconnaît presque instantanément la couleur d'un objet, on détermine très rapidement la quantité d'items dans un ensemble (Burr & Ross, 2008). La numérosité ne dépend pas des caractéristiques physiques des éléments comme leur forme ou leur taille. La perception de la quantité peut être exprimée de façon approximative à l'aide des termes de grandeur comme « peu » et « beaucoup ». La quantité peut également être exprimée de façon précise en donnant un nombre exact. Cette aptitude à reconnaître rapidement les numérosités de façon approximative serait innée et partagée avec certaines espèces du monde animal (Cantlon & Brannon, 2006; Rugani, Vallortigara, Priftis, & Regolin, 2017).

Selon l'ordre de grandeur de la numérosité, différents processus de perception sont mis à l'œuvre. Dans la littérature, on compte trois compétences distinctes qui permettent la perception et le traitement des quantités numériques (illustrées en Figure 1.1) :

- La première permettrait de dénombrer rapidement des petites quantités : c'est le phénomène de **subitisation** (*subitizing* en anglais). Elle utiliserait une représentation exacte et précise du nombre.
- La seconde utiliserait l'évaluation grossière et la comparaison pour déterminer des proportions relatives : c'est le **Système de Nombres Approximatif** (*Approximate Number System* en anglais ou **SNA**).
- Le troisième système permettrait d'expliquer la représentation des très grandes numérosités, appelées densité, que nous ne développerons pas dans cette thèse (voir Anobile, Cicchini, & Burr, 2016, pour une revue).

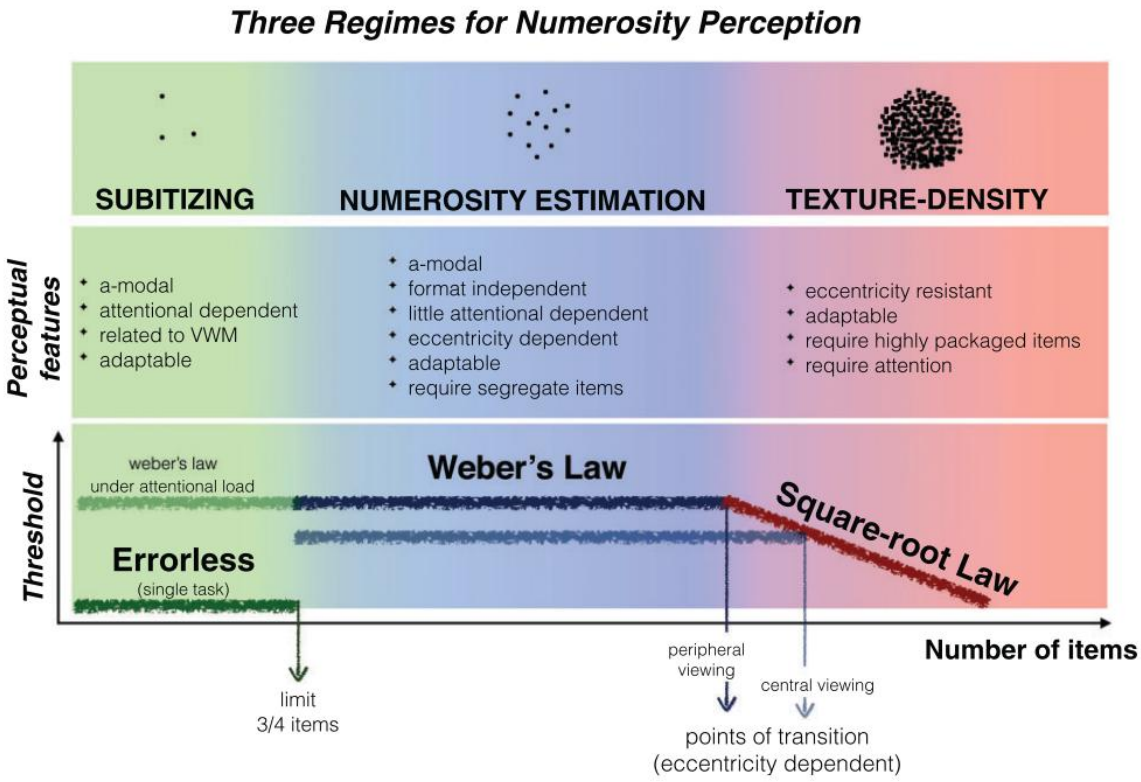

Figure 1.1 – Caractéristiques des trois systèmes de traitement des numérosités selon leur ordre de grandeur. Figure adaptée de Anobile et al. (2016)

1.1.1.1 1, 2, 3 … et le reste

Le système de **subitisation** (dérivé de *subitus* qui signifie soudain en latin) est utilisé spontanément lors de la reconnaissance d'une petite quantité d'items (jusqu'à quatre selon l'âge). La représentation de cet ensemble serait exacte (Kaufman, Lord, Reese, & Volkmann, 1949). Dès 1885, Cattell montre que lorsque des cartes contenant des points noirs sont présentées pendant un temps bref, les adultes sont plus ou moins précis et rapides à les dénombrer selon le nombre de points présents sur la carte. Cette expérience a été reprise ensuite par Mandler et Shebo (1982) qui ont montré qu'en dessous de quatre items, les temps de réaction étaient très courts et tous similaires. Ils en ont conclu que le nombre d'objets était instantanément reconnu. Cet effet est indépendant de la configuration, de la forme (symbolique *vs.* non-symbolique) ou de la modalité de présentation des éléments puisque la subitisation fonctionne également avec des stimuli auditifs (Camos & Tillmann, 2008) ou encore tactiles (Gimbert, 2016). Selon Dehaene (2010) ce phénomène repose sur la capacité du système à extraire rapidement et en parallèle la position des objets à travers le champ visuel, grâce à l'existence d'un **système de localisation d'objets** (*Object Tracking System* en anglais, Mandler & Shebo, 1982). Ce système basé sur les caractéristiques spatio-temporelles des objets est utilisé pour quantifier les objets jusqu'au nombre de trois. Il s'agirait donc d'un phénomène de perception immédiate. Au-delà de trois items, Mandler et Shebo (1982) rapportent une

augmentation linéaire du temps de réponse pour dénombrer chaque item supplémentaire qui correspond au temps de récitation des chiffres. Cela suggère que les adultes comptent lorsqu'il y a plus de trois objets (environ 200 millisecondes par item additionnel). Chez les enfants, des résultats similaires ont été observés, avec une pente de comptage moins importante (environ 1 à 2 secondes par item additionnel). En effet, le temps de récitation est plus long chez les enfants que les adultes. Si compter s'avère être une stratégie efficace pour des petites numérosités, elle n'est pas la meilleure option au-delà d'un certain nombre d'items. Dans ce cas, nous allons plutôt adopter une stratégie d'estimation des numérosités, qui sera une méthode moins coûteuse mais aussi moins précise.

1.1.1.2 Le Système de Nombre Approximatif (SNA)

Pour estimer de plus grandes numérosités et se les représenter, les primates humains et non-humains utilisent un système plus approximatif que la subitisation appelé **Système de Nombre Approximatif**. Le SNA permet d'estimer très rapidement la quantité et de discriminer différents ensembles d'items sur leur propriété quantitative. Les études sur les animaux (singes, oiseaux, poissons, etc.) conduisent à penser que cette capacité à estimer les quantités numériques chez l'homme est un héritage issu de l'évolution (Agrillo, Dadda, Serena, & Bisazza, 2008; Bogale, Kamata, Mioko, & Sugita, 2011; Cantlon & Brannon, 2007; Rugani et al., 2017 ; voir Cantlon et al., 2009 pour une revue). Les études qui ont montré une sensibilité aux nombres chez les bébés suggèrent que la signature comportementale du SNA émerge très tôt dans le développement (Bulf, de Hevia, & Macchi Cassia, 2016; de Hevia, Girelli, Addabbo, & Cassia, 2014; de Hevia, Izard, Coubart, Spelke, & Streri, 2014; Xu & Spelke, 2002). Cette signature se traduit par des réponses à des tâches de comparaison numérique et d'estimation qui suivent la loi de Weber (1846) (Crollen, Grade, Pesenti, & Dormal, 2013; Whalen, Gallister, & Gelman, 2012). Cette loi physique décrit les relations entre la perception de la grandeur d'un stimulus et sa grandeur absolue (S).

$$\frac{\Delta S}{S} = k^{1}$$

ΔS est la plus petite différence d'intensité perçue et k la constante caractéristique de la modalité sensorielle en question. Cette loi peut être vue comme une loi de la sensation, dans laquelle le rapport entre la plus petite différence d'intensité perçue et la valeur du stimulus étalon reste constant. Par conséquent, si la valeur du stimulus étalon augmente, la plus petite différence perçue augmentera avec elle. La numérosité est considérée comme une dimension perceptive parmi les autres dimensions qui obéissent également à la loi de Weber. La comparaison entre deux numérosités se fait en fonction du ratio de leur différence et non pas en fonction de leur différence

[1] Fraction de Weber

réelle. La plus petite différence perçue entre deux ensembles augmente avec l'augmentation de la numérosité. Par exemple, si deux ensembles de 10 et 20 points sont présentés, il est très facile de déterminer lequel est le plus grand (ou le plus petit). La difficulté augmente si on présente deux ensembles de 40 et 50 points (Figure 1.2). La différence entre les deux ensembles reste de 10 points, par contre le ratio passe de 0.5 à 0.8[2]. Pour que la discrimination soit aussi rapide que dans le premier cas, il faudrait présenter deux ensembles avec le même ratio de 0.5, c'est-à-dire 40 et 80 points.

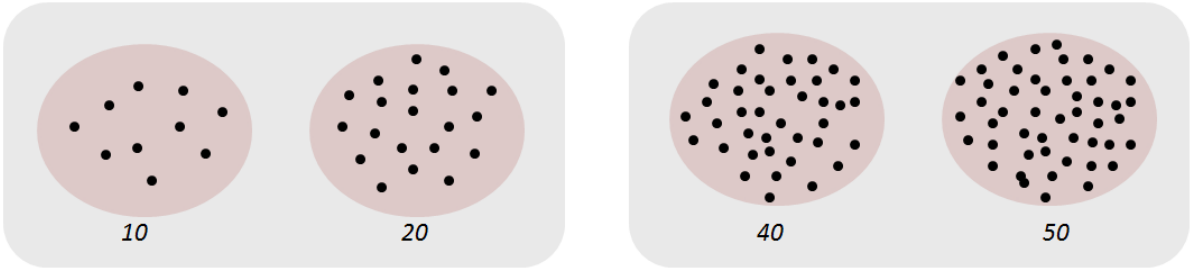

Figure 1.2 - Illustration de la loi de Weber. Pour les deux ensembles séparément, 10 points différencient les deux numérosités. Par contre, le ratio change (0.5 à gauche et 0.8 à droite). Il est plus facile de discriminer les ensembles de gauche que de droite.

Des performances similaires, dans ce type de tâches, ont été observées chez les primates humains et non-humains. Une étude a directement testé les performances d'adultes humains et de singes dans une tâche de comparaison d'ordre de magnitude numérique (expérience 2, Cantlon & Brannon, 2006). Deux numérosités étaient présentées sur un écran d'ordinateur et la tâche était de sélectionner d'abord la plus petite numérosité puis la plus grande. Le ratio entre les deux numérosités présentées (plus petit/plus grand) variait de 0.1 à 0.9. De façon équivalente chez l'humain adulte et le singe, les temps de réaction et les pourcentages d'erreur augmentaient avec le ratio entre les deux stimuli (correspondant à des numérosités de plus en plus proches). En accord avec la loi de Weber, l'estimation de la quantité est de moins en moins précise avec l'augmentation de la numérosité. Des résultats similaires ont été observés lors de tâches arithmétiques avec des stimuli non-symboliques. Les singes ayant des résultats très proches de ceux des adultes humains, cela appuie l'hypothèse d'un mécanisme de représentation approximative des nombres hérité de l'évolution (Cantlon & Brannon, 2007).

De la loi de Weber découle l'**effet de distance**, initialement découvert par Moyer et Landauer en 1967 puis repris par Dehaene, Dupoux et Mehler en 1990 avec des tâches de comparaison numérique. Les participants devaient comparer des nombres compris entre 30 et 100, présentés sur un écran sous leur forme symbolique, au nombre 65 (tâche : < ou > 65 ?). Les chercheurs ont observé

[2] Rapport entre les deux ensembles illustrés en Figure 1.2. 10/20 = 0.5 et 40/50=0.8

que plus la distance numérique entre le nombre présenté et le nombre de référence (65) était proche, plus les temps de réponse augmentaient et plus les erreurs se faisaient fréquentes (Figure 1.3). Il semble donc plus facile de distinguer deux nombres éloignés que proches. Une hypothèse explicative est que lorsqu'une numérosité est activée, celles qui lui sont proches le sont aussi mais plus faiblement. Il devient alors plus difficile de dire que deux nombres proches sont différents.

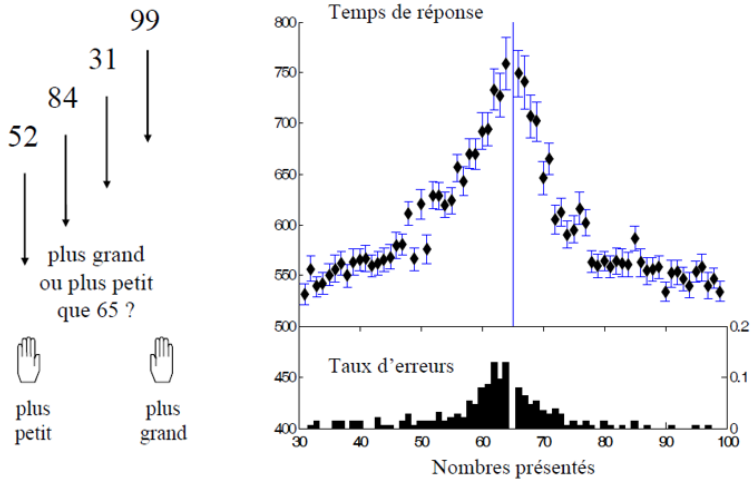

Figure 1.3 – Effet de distance. A gauche, la tâche de comparaison de magnitude et à droite les temps de réponse et taux d'erreurs en fonction du nombre présenté. On observe que les temps de réponse (en millisecondes) et le taux d'erreurs augmentent lorsque le nombre présenté se rapproche du standard 65. Figure adaptée de Dehaene et al. (1990).

Les études en imagerie cérébrale chez le singe corroborent cette hypothèse. Il existerait des neurones codant pour une quantité précise localisés dans le cortex préfrontal (voir Nieder, 2005 pour une revue). Ces neurones déchargeraient également pour les items proches, indiquant leur sensibilité pour des nombres compris dans un intervalle proche. Par exemple, les neurones qui déchargent pour l'item 4 répondent également pour les items 3 ou 5 (Nieder, 2005; Nieder & Miller, 2004). L'effet de distance est un des effets numériques les plus robustes, que l'on retrouve avec des stimuli numériques aussi bien symboliques que non-symboliques. Essentiellement observé sur des temps de réaction et des taux d'erreurs, l'effet de distance est aussi susceptible de se refléter sur les paramètres moteurs d'un mouvement comme nous le verrons dans l'**Article 3** de cette thèse.

Pour résumer, plus la numérosité augmente, moins la discrimination est précise. Plus la distance entre deux nombres est petite, plus il nous sera difficile de les discriminer. Si certaines espèces partagent ces lois d'estimation avec les humains, elles sont également présentes tôt dans le développement puisque les enfants les utilisent aussi. La singularité de l'adulte humain réside dans sa capacité à utiliser la forme symbolique des nombres, c'est-à-dire le nombre sous sa forme écrite en toutes lettres ou en chiffre arabe. Mais comment fait-on la correspondance entre les formes symboliques et non-symboliques des nombres ?

1.1.1.3 Concept du nombre

Les êtres humains ont la capacité à comprendre qu'un chiffre, présenté sous différentes formes de représentation, a le même sens. Par exemple, nous reconnaissons l'item trois qu'il soit écrit en **chiffre arabe (3)**, en **toutes lettres (trois)**, en **chiffre romain (III)**, sous forme de **points (•••)** ou encore sous sa forme **auditive (/trwa/)**. Les adultes sont capables de faire la correspondance entre toutes ces entrées sensorielles, et de convertir une magnitude en nombre abstrait et vice versa, capacité qui sert de base aux aptitudes mathématiques. Précisons qu'un grand nombre d'études s'intéresse aux compétences arithmétiques et à la faculté d'effectuer des opérations, mais elles ne seront pas détaillées dans cette thèse (voir Brysbaert, 2018; Dehaene, Molko, Cohen, & Wilson, 2004; Gelman & Butterworth, 2005; Mock, Huber, Klein, & Moeller, 2016 pour des revues). Ces études offrent toutefois des données essentielles pour la compréhension du traitement des quantités.

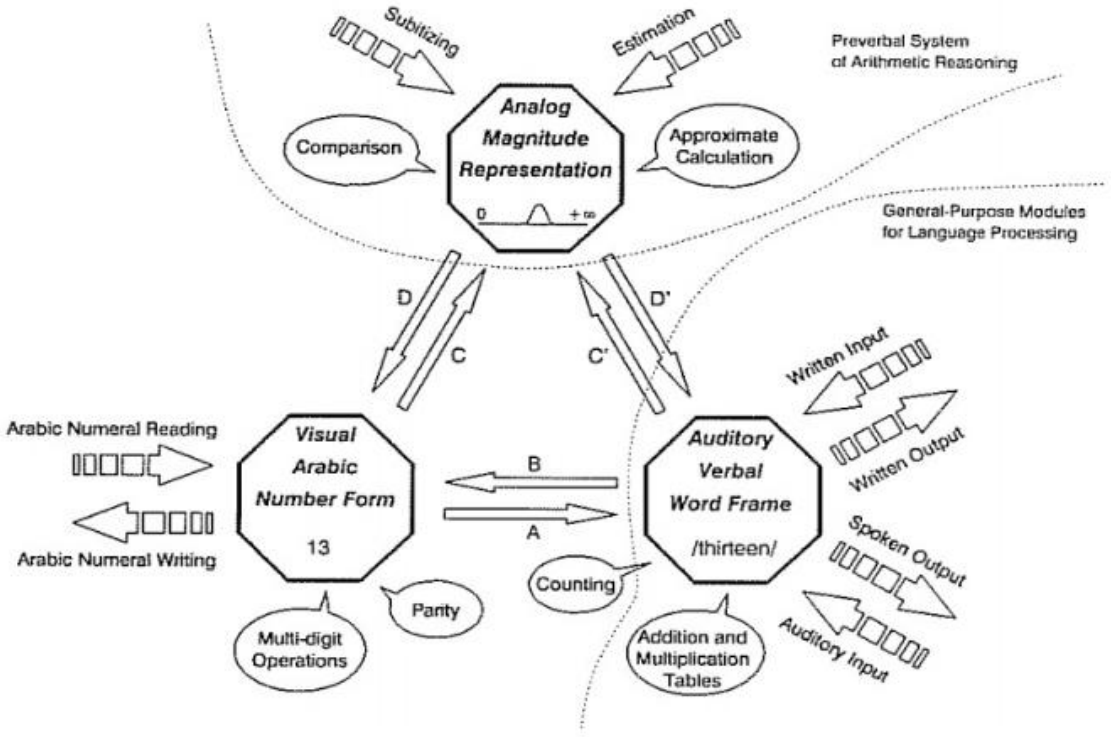

Figure 1.4 - Modèle du triple-code de Dehaene (1992) organisé selon trois grands systèmes de représentations mentales des nombres avec 1) une représentation analogique de la magnitude (« Analog Magnitude Representation »), un code linguistique verbal (« Auditory Verbal Word Frame ») et un code Indo-Arabe écrit (« Visual Arabic Number Form »). Les procédures de transcodage permettent de passer d'un système à l'autre.

Le modèle du triple-code (Dehaene, 1992), illustré en Figure 1.4, propose une architecture de la représentation analogique et symbolique des nombres chez l'adulte. Ce modèle est à la fois anatomique et fonctionnel puisqu'il est étayé par des éléments neuro-anatomiques et des observations comportementales. **La représentation analogique** des quantités numériques

correspond à la dimension quantitative de la magnitude partagée par d'autres espèces et le nouveau-né humain. Cette représentation est aussi appelée **le sens du nombre**. Indépendante du langage, elle permet d'effectuer des estimations, des comparaisons et des calculs approximatifs. **La représentation symbolique,** divisée en deux codes, **visuelle arabe** et **auditive verbale**, représente les nombres sous leurs différentes modalités visuelle ou auditive. Sous sa forme visuelle, elle décrit le nombre comme une entité abstraite, qui active immédiatement le concept de quantité qui lui est associé. Elle est utilisée pour des tâches de jugement de parité et des opérations mathématiques. La forme auditive verbale englobe les représentations verbales et auditives qui permettent par exemple de compter à haute voix. Cette représentation symbolique est acquise par l'expérience. L'apprentissage des symboles est critique pour le développement des capacités mathématiques car il permet une représentation précise et exacte du nombre contrairement à la représentation non-symbolique plus approximative. Le code indo-arabe est sollicité au début de l'école primaire et ne dépend pas de la langue maternelle. A partir des chiffres (de 0 à 9), l'homme apprend un système de notation qui lui permet d'écrire l'ensemble des nombres existants, bien que le statut du 0 soit plus complexe. Chez les enfants, cette représentation est organisée en un continuum logarithmique puisqu'on observe une compression des grands nombres (Siegler & Booth, 2017; Siegler & Opfer, 2003). En effet, lorsqu'on demande à des enfants de placer un nombre aléatoire sur une ligne allant de 1 et 100 (1 à gauche de la ligne, 100 à droite), ils ne vont pas allouer le même espace aux petits et aux grands chiffres. Les distances réelles entre les nombres ne sont pas respectées quantitativement parlant. Mais ce système d'approximation semble se préciser au cours du développement, puisque vers 7 ans, cette représentation tend à se linéariser. Avec l'éducation et l'apprentissage du langage et des symboles, la représentation des nombres devient linéaire: le même espace est alloué entre 10 et 20 et entre 80 et 90. Si les adultes possèdent bien une représentation linéaire des nombres de 1 à 100, la question peut se poser pour des valeurs bien plus grandes, comme de 1 à 100 000. Il est probable que la représentation pour de si grandes quantités soit également logarithmique puisque nous les manipulons moins souvent.

Le langage donc joue un rôle important dans l'acquisition du concept du nombre (Brysbaert, 2018; Gelman & Butterworth, 2005; Siegler & Booth, 2004; Siegler & Opfer, 2003). Mais sans éducation et sans apprentissage d'un langage numérique, comment le cerveau se représente-t-il les nombres ? Pour répondre à cette question, des chercheurs ont mené des études chez les Indiens Mundurucús vivant en Amazonie. Dans cette population, le lexique numérique est extrêmement limité puisqu'il n'existe pas de mot pour désigner les quantités numériques au-delà des chiffres 4 et 5. Même le mot pour désigner le chiffre 5 se confond avec celui utilisé pour désigner une main. Ce lexique numérique réduit n'altère pourtant pas les performances des adultes Mundurucús lors de tâches de comparaison de magnitudes puisqu'ils obtiennent des performances similaires à celles des

occidentaux (Izard, Pica, Spelke, & Dehaene, 2008; Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004). De façon intéressante, leur représentation des nombres suit une courbe logarithmique comme celle des enfants. En revanche, leurs performances diminuent nettement lors de calculs arithmétiques simples telle que la soustraction (Pica et al., 2004). Ces résultats suggèrent qu'en dépit d'un vocabulaire numérique limité, l'estimation des quantités est possible de manière approximative, ce qui conforte l'existence d'un SNA inné. Par contre, le caractère linéaire de la représentation numérique se développe grâce à l'éducation et au langage.

Parmi les nombreuses aires cérébrales impliquées dans le traitement des nombres, le lobe pariétal joue un rôle primordial. Un grand nombre d'études physiologiques sur le primate humain et non-humain a permis de mettre en évidence que **la région horizontale du sillon intra-pariétale** (hIPS, *horizontal segment of the intraparietal sulcus* en anglais) s'active systématiquement lors du traitement numérique ou même lors de la simple présentation d'un nombre. Cette région est d'autant plus activée lorsqu'on demande de manipuler les nombres, comme pour des calculs mathématiques (Chochon, Cohen, van de Moortele, & Dehaene, 1999; Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan, & Dehaene, 2002). Une lésion de cette région entraîne d'ailleurs d'importantes difficultés dans les jugements numériques sans que les autres fonctions cognitives ne soient impactées (Dehaene et al., 2004; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003). Un effet de distance numérique a également été observé au niveau neuro-anatomique. L'augmentation de la distance entre un nombre donné et un nombre de référence, qui entraîne une diminution du temps de réaction à la tâche de discrimination, se reflète par une diminution de l'activité cérébrale de cette région en lien avec la facilité de la tâche. Plus la différence entre le nombre donné et celui de référence augmente, plus les temps de réponse diminuent et plus l'activité cérébrale de cette région hIPS diminue. Par ailleurs, chaque modalité de représentation des nombres (symbolique, non-symbolique) permet l'activation de cette région, mais pas les autres aspects du chiffre comme leur forme. Tous ces arguments suggèrent que la région hIPS code plus largement pour le concept de quantité indépendamment du format de notation.

Quel est le lien entre ces différences notations ? Le modèle de triple-code de Dehaene (1992) explique les relations entre les différentes représentations et l'articulation entre la dimension analogique et la dimension symbolique avec un processus de transcodage permettant de passer directement d'un code à l'autre. Cependant, le modèle ne permet pas de répondre à une des grandes questions actuelles de recherche correspondant au « problème du fondement des symboles » (*symbol-grounding problem* en anglais). A ce jour, la façon dont les symboles numériques deviennent des représentations sémantiques de la quantité n'est pas clairement établi (voir Leibovich & Ansari, 2016 et Reynvoet & Sasanguie, 2016 pour des revues). Certains auteurs défendent l'idée qu'un système approximatif (i.e. le SNA) servirait de base pour la construction de la

représentation symbolique, et que ce système serait partagé par toutes les représentations non-symboliques du nombre. Bien que l'acquisition de la signification du nombre sous sa forme symbolique reste une question ouverte, des différences entre le traitement des représentations symboliques et non-symboliques ont été rapportées au niveau neuro-anatomique (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Kaas, Henik, & Goebel, 2007; Eger et al., 2009; Piazza, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2007). Le traitement de haut niveau des magnitudes symboliques semble ainsi plutôt emprunter une voie dans la région intrapariétale de l'hémisphère droit, tandis que le traitement des magnitudes non-symboliques se ferait plutôt dans l'hémisphère gauche comme illustré dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Cappelletti, Freeman, & Cipolotti, 2009; Dehaene, 2010). La région hIPS gauche s'activerait, peu importe le format de présentation du chiffre, sous sa forme **arabe** ou **écrite en toutes lettres (ou mots de chiffres),** alors que la région hIPS droite ne s'activerait que pour les chiffres arabes. En revanche, la notion de quantité impliquerait, elle, la région intrapariétale des deux hémisphères. Dehaene et Cohen (1995) proposent donc l'existence d'un circuit universel dans les deux hémisphères, partagé par les autres espèces pour le traitement des magnitudes non-symboliques et un circuit localisé dans l'hémisphère gauche associé au nombre sous sa forme symbolique. Cette dernière, spécifique à l'homme, est directement liée au langage et aux apprentissages des stratégies arithmétiques. Selon Dehaene (2010), les aires du langage seraient directement en lien avec la région hIPS, de telle sorte que notre cerveau convertirait immédiatement un chiffre arabe ou écrit sous sa forme quantitative.

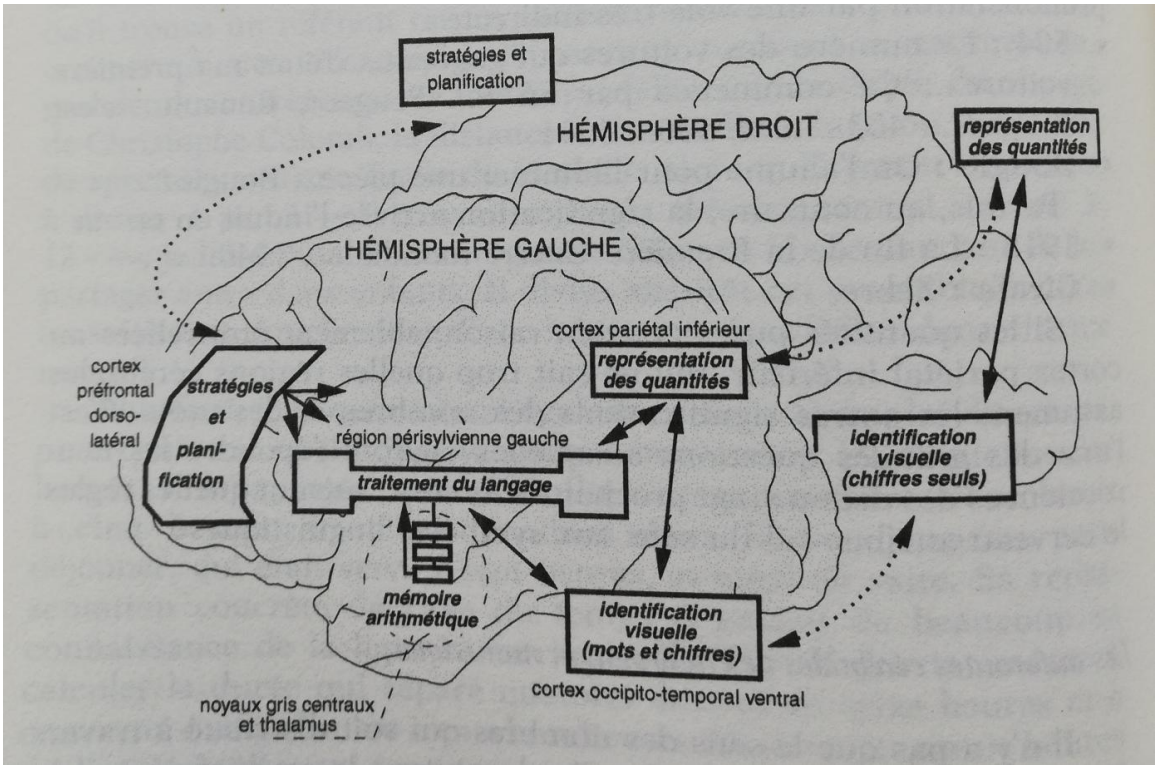

Figure 1.5 - Principales régions cérébrales impliquées dans le traitement des nombres sous leur forme symbolique ou non-symbolique. Figure tirée de Dehaene (2010).

Même au sein des représentations symboliques, les chercheurs ont observé des différences entre la forme arabe et la forme écrite en toutes lettres des chiffres au niveau comportemental. De façon générale, les chercheurs observent que le temps de traitement des mots de chiffres est plus long que celui des chiffres arabes reconnus plus rapidement (Brysbaert, 2018; Brysbaert & Holloway, 2014; Kadosh, Henik, & Rubinsten, 2008). Comparée aux chiffres écrits en toutes lettres, l'accès à l'information sémantique et conceptuelle des chiffres arabes serait plus rapide (Fias, 2001). Les adultes et enfants sont également plus rapides pour effectuer des calculs mathématiques en manipulant des chiffres arabes plutôt que des chiffres écrits en toutes lettres (voir Brysbaert, 2018, pour une revue). D'autres études ont montré que comparer des numérosités présentées dans des formats différents entraîne des temps de réponse plus courts que si la comparaison se présente sous un seul format (Maloney, Risko, Preston, Ansari, & Fugelsang, 2010), ce qui suggère que le traitement numérique entre les modalités requiert un temps supplémentaire. Cette propriété temporelle de traitement des différentes notations symboliques a été utilisée pour tester les associations spatio-numériques dans l'**Article 1** de cette thèse.

1.1.2 Représentation spatiale des numérosités

Les nombres sont également indissociables de l'espace. Un des effets les plus connus représentant l'association entre les nombres et l'espace est **l'effet SNARC** (*Spatial Numerical Association of Response Codes* en anglais). Il a été initialement décrit par Dehaene et ses collaborateurs dans une série de neuf expériences (Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993).

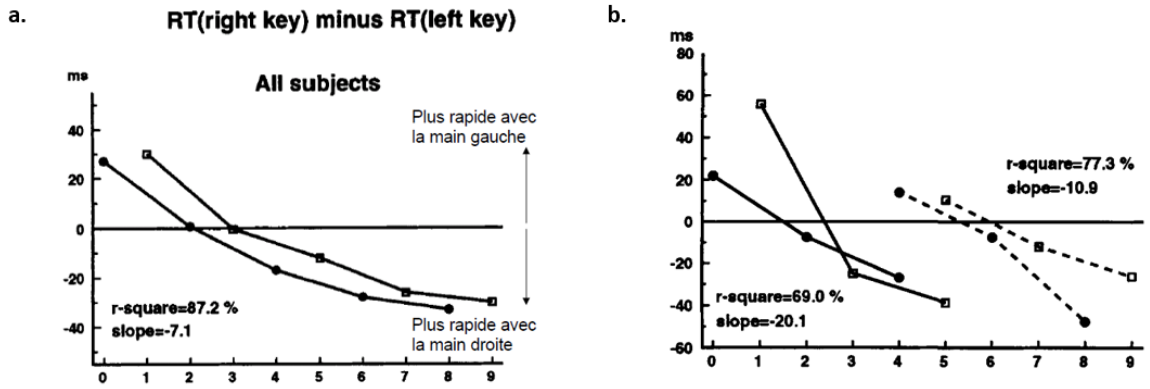

Figure 1.6 – A gauche, première démonstration de l'effet SNARC. Différences de temps de réaction avec la main droite et la main gauche en fonction de chaque chiffre (une courbe pour les chiffres pairs et une courbe pour les chiffres impairs). Une pente négative indique la présence d'un effet SNARC, i.e. plus la magnitude du chiffre augmente, plus les réponses avec la main droite sont rapides. A droite, effet SNARC pour différents intervalles : soit les chiffres de 0 à 5 étaient présentés, soit les chiffres de 5 à 9. Figures tirées de Dehaene et al. (1993).

Dans la première de leurs expériences, des chiffres de 0 à 9 étaient présentés au centre d'un écran. Le participant avait pour consigne d'appuyer avec la main gauche sur un bouton à gauche lorsque le chiffre était pair et d'appuyer avec la main droite sur un bouton à droite lorsque le chiffre était

impair. Dans une seconde condition, le côté des réponses était inversé (i.e. main gauche pour chiffre impair et main droite pour chiffre pair). Les deux conditions étaient contrebalancées. Les résultats ont montré qu'indépendamment de la parité du chiffre, les participants répondaient plus rapidement aux petits chiffres avec la main gauche et plus rapidement aux grands chiffres avec la main droite. Les autres expériences de cet article princeps de 1993 ont mis en évidence les propriétés de ces associations entre les nombres et l'espace. Tout d'abord, c'est la taille relative des nombres et non pas la taille absolue qui compte. Le chiffre 5 dans un intervalle de 0 à 5 engendre des réponses plus rapides avec la main droite puisqu'il correspond à la plus grande magnitude et dans un intervalle de 5 à 9, il engendre des réponses plus rapides avec la main gauche puisqu'il devient le plus petit chiffre (étude 5 de Dehaene et al., 1993, Figure 1.6). De plus, ce n'est pas la main utilisée pour répondre qui importe mais plutôt sa position dans l'espace (Dehaene et al., 1993). En effet, lorsque les participants doivent réaliser l'expérience avec les mains croisées, le côté de la réponse interagit avec les chiffres mais pas avec la main utilisée pour répondre.

Cette association entre les localisations dans l'espace et les nombres a donné lieu à la métaphore de la **Ligne Mentale Numérique** (LMN, ou Ligne Mentale de Nombres), concept déjà introduit par Galton en 1880, qui reflète la position symbolique que les nombres occupent dans l'espace mental de la plupart des individus. La LMN est spécifique dans son orientation spatiale, de gauche à droite, dans les cultures occidentales. Cette représentation reflète d'ailleurs à l'environnement dans lequel nous évoluons. L'orientation gauche-droite des nombres sur les règles que l'on utilise dès l'école sont bien l'exemple de notre civilisation le plus manifeste de ces associations. Aujourd'hui, on compte un nombre considérable d'études sur les associations spatio-numériques, qui révèle la robustesse de cette association et bien d'autres propriétés intéressantes (voir Wood, Willmes, Nuerk, & Fischer, 2008 pour une méta-analyse). L'effet SNARC a été observé avec différentes tâches, qu'elles fassent référence explicitement ou implicitement à la quantité (Dehaene et al., 1993; Fias, Brysbaert, Geypens, & D'Ydewalle, 1996). Les tâches dites explicites sont des tâches qui nécessitent d'activer la magnitude du chiffre pour répondre à la tâche, comme celle de la comparaison de magnitudes (e.g. indiquer si le nombre présenté est supérieur ou inférieur à 5). Les tâches dites implicites sont des tâches qui ne requièrent pas un traitement explicite de la quantité pour répondre à la question, comme la tâche de jugement de parité (juger si le chiffre est pair ou impair). La tâche de détection de phonème, qui a été également utilisée dans certaines expériences, est aussi une tâche implicite mais se différencie de la tâche de jugement de parité par sa profondeur du traitement sémantique. Si les tâches de jugement de parité et de comparaison de magnitude exigent un traitement sémantique, ce n'est pas le cas pour la tâche de détection de phonème, ou encore de jugement de couleur. Ces différentes tâches catégorisées comme implicites ou explicites et qui se différencient en termes de traitement sémantique requis ont été utilisées dans

le but d'examiner le rôle du traitement numérique et sémantique sur les associations spatio-numériques. Dans leur méta-analyse, Wood et al. (2008) démontrent que les tâches qui requièrent un traitement sémantique plus profond mènent à un effet SNARC plus fort. Néanmoins, une récente étude propose que ce ne serait pas le niveau de traitement sémantique qui module la force de l'effet SNARC mais plutôt la latence des réponses: les latences les plus longues sont corrélées avec un effet SNARC plus prononcé (Didino, Breil, & Knops, 2019). En plus de la tâche, l'effet des différents formats de présentations des quantités (forme symbolique ou non-symbolique) a été examiné (Fias, 2001; Nuerk, Wood, & Willmes, 2005; Pressigout, Charvillat, Mersad, & Doré-Mazars, 2018), ainsi que le format de présentation des stimuli (visuelle ou auditive, Nuerk et al., 2005). L'effet a également été répliqué pour différentes actions motrices avec différents effecteurs : on l'observe sur des réponses d'appui-bouton ou de pointage (Hesse, Fiehler, & Bremmer, 2016), mais aussi sur des réponses oculaires (Fischer, Warlop, Hill, & Fias, 2004; Hesse et al., 2016; Pressigout et al., 2018; Schwarz & Keus, 2004). Toutes ces expériences ont observé une préférence pour effectuer des mouvements à gauche (ou dirigés vers la gauche) en réponse à des petits chiffres et à droite (ou dirigés vers la droite) en réponse à des grands chiffres. Au-delà des biais moteurs, un biais attentionnel a également été montré en utilisant le paradigme de Posner (Fischer, Castel, Dodd, & Pratt, 2003; Posner, 1980). Dans cette expérience de Fischer et al. (2003), les participants devaient fixer un point présenté au centre de l'écran entre deux carrés présentés respectivement à 5° d'excentricité à gauche et à droite. Un chiffre (1, 2, 7 ou 9) apparaissait pendant 300 millisecondes à la place du point de fixation puis ce dernier était à nouveau présenté pendant un temps aléatoire. Ensuite, en vision périphérique, un des deux carrés se noircissait, ce qui correspondait à la cible à détecter. La consigne était de détecter le plus rapidement possible la cible périphérique tout en maintenant la fixation au centre. En moyenne, les participants détectaient plus vite une cible à gauche (ou à droite) quand elle était précédée d'un petit chiffre (ou d'un grand chiffre). L'orientation de l'attention visuo-spatiale est donc affectée par la magnitude numérique qui entraîne une forte attraction de l'attention vers un côté de l'espace. Cette expérience reflète le codage spatial de la magnitude du chiffre. Ce lien quasi systématique entre la quantité numérique et les localisations dans l'espace suggère un traitement automatique de la quantité numérique et de sa représentation spatiale. Un des objectifs de cette thèse est d'investiguer l'effet SNARC sur des réponses oculomotrices en comparaison aux réponses manuelles tout en manipulant la nature des représentations symboliques de la quantité numérique (voir **Article 1**).

Cette association spatio-numérique semble partagée par la plupart des individus, toutefois les participants pour lesquels leur système de lecture et d'écriture est différent de l'orientation gauche-droite ne montrent pas un effet SNARC classique (Dehaene et al., 1993; Hung, Hung, Tzeng, & Wu, 2008; Ito & Hatta, 2004; Shaki, Fischer, & Petrusic, 2009). Chez des adultes Palestiniens, qui

lisent de droite à gauche, l'association spatio-numérique semble être inversée (droite-gauche) puisqu'ils sont plus rapides pour catégoriser les petits chiffres avec leur main droite et les grands chiffres avec leur main gauche (Shaki et al., 2009). Bien que les habitudes culturelles modulent de manière plus générale l'orientation gauche-droite de la ligne mentale, des études ont montré l'existence d'une préférence gauche-droite chez certains animaux et chez des nouveau-nés (Bulf et al., 2016; de Hevia, Girelli, et al., 2014; Rugani & de Hevia, 2017), suggérant que comme la perception de la quantité, l'association spatio-numérique existent avant l'apprentissage du langage, ce qui renforce l'idée d'un système hérité de l'évolution.

Au-delà des différences culturelles, notons que ces associations entre nombre et espace peuvent être flexibles. Tout d'abord, elles sont sujettes à une grande variabilité individuelle. Généralement, l'effet SNARC est observé chez deux tiers des participants (Pressigout et al., 2018; Viarouge, Hubbard, & McCandliss, 2014; Wood, Nuerk, & Willmes, 2006b). De plus, lorsque l'on demande à des participants de se représenter les nombres sur une horloge, un pattern d'effet SNARC inverse est observé reflétant une association entre les petits chiffres avec l'espace droit et les grands chiffres avec l'espace gauche (Bächtold, Baumüller, & Brugger, 1998). Une instruction d'imagerie mentale permet donc d'inverser l'orientation habituelle de gauche à droite de la LMN. Au-delà de la dimension horizontale, la ligne mentale de nombres s'étendrait également à la dimension verticale, traduisant l'association des petits chiffres avec l'espace inférieur (en bas) et des grands chiffres avec l'espace supérieur (en haut) (Ito & Hatta, 2004; Lachmair, Dudschig, De, & Kaup, 2014; Schwarz & Keus, 2004).

1.2 Un sens des magnitudes ?

Il semble évident aujourd'hui que le concept du nombre ne peut être évoqué sans être relié au concept de magnitude. Nous avons vu que les nombres étaient étroitement liés à l'espace, mais il semblerait qu'ils soient également liés à d'autres magnitudes continues, c'est-à-dire d'autres grandeurs variables pouvant s'exprimer quantitativement. La question se pose d'un système de nombre approximatif qui n'est pas exclusivement utilisé pour les représentations numériques (Cantlon et al., 2009). Par exemple, les magnitudes numériques sont souvent confondues avec les magnitudes de taille, chez les enfants comme chez les adultes. Une interaction comportementale qui illustre à merveille l'influence des dimensions de taille physique et numérique est l'**effet de congruence de taille** (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Linden, et al., 2007; Henik & Tzelgov, 1982). Lorsqu'on présente à des adultes deux chiffres côte à côte de différentes tailles numériques et physiques,

CONGRUENT	5 3
INCONGRUENT	3 5

Tableau 1.2 Illustration des conditions expérimentales congruente et incongruente entre la taille physique et la taille numérique. Figure adaptée de Henik et Tzelgov (1982).

comme illustré dans le Tableau 1.2, et qu'on demande de juger lequel des deux chiffres est le plus grand numériquement, la taille physique du chiffre va influencer les performances à la tâche de jugement numérique. Quand l'ordre de magnitude de la taille physique est différent de celui de la taille numérique (i.e. condition incongruente), le temps de réaction des adultes augmente et cette condition les conduit parfois même à faire des erreurs. En revanche, la condition congruente (même ordre de magnitude pour les tailles physique et numérique) entraîne une diminution des temps de réponse. La taille physique du stimulus, qui n'est pourtant pas une information pertinente pour effectuer la tâche de comparaison de magnitude numérique, perturbe le traitement de la magnitude numérique. Les recherches plus récentes ont permis d'étendre le sens des nombres à un sens plus large, celui des magnitudes. La perception des magnitudes qui peuvent se représenter sur un continuum suit la loi de Weber. De ce fait, toute propriété unidimensionnelle d'un objet ou ensemble (taille, longueur, durée, intensité lumineuse ou sonore) pourrait recruter le même système et des bases cérébrales communes au traitement des nombres. Lors d'une tâche de comparaison, pour laquelle notre habileté à détecter un changement dépend du ratio entre les deux magnitudes à comparer, ces dimensions montrent des patterns similaires. Un grand nombre d'études comportementales, en neuro-imagerie ou provenant de la neuropsychologie, sont en faveur d'un système universel de représentation des nombres sous forme de magnitudes mentales. Elles ont mis en exergue un chevauchement entre les régions qui reflètent le traitement des numérosités et des autres dimensions continues (Cappelletti et al., 2009; Dormal, Andres, & Pesenti, 2012). Par exemple, une étude en imagerie par résonnance magnétique fonctionnelle (IRMf) a montré que les régions occipito-temporale région bilatérale **IPS** (*intrapariétal sulcus* en anglais) s'activaient lorsque les participants devaient effectuer des tâches de comparaison de magnitude, qu'elle soit numérique, de taille et même de luminance, ce qui suggère un lien étroit entre ces différentes magnitudes (Pinel, Piazza, Le Bihan, & Dehaene, 2004)

Pour conclure, la perception des nombres reposerait sur un processus général selon lequel l'extraction de la quantité se fait également par le biais des autres magnitudes (Gebuis & Reynvoet, 2012; Leibovich, Katzin, Harel, & Henik, 2017). Un sens des magnitudes serait un précurseur au sens des nombres (Leibovich et al., 2017), rendant ce dernier automatique et remettant en question le caractère inné du sens des nombres. Le sens des magnitudes permettrait la correspondance entre les dimensions de temps, d'espace et de nombre mais aussi avec d'autres magnitudes comme la taille, l'intensité sonore ou l'intensité lumineuse. Le sens du nombre se construirait via l'expérience et l'apprentissage puisque que dans notre environnement, nous retrouvons souvent des correspondances naturelles entre les différentes magnitudes. Cet apprentissage, contrairement à celui de la symbolique du nombre, est donc naturel et réalisé à partir des entrées sensorielles. Du point de vue de la cognition motrice, les représentations internes des **transformations sensori-**

motrices semblent tout aussi importantes. Les processus de transformation sensori-motrice représentent le circuit par lequel des informations visuelles relatives aux objets sont converties en commande motrice (voir section 2.3.1, encadré 1.1). En effet, tout geste orienté vers un objet nécessite de le localiser dans l'espace parmi d'autres objets et par rapport à notre corps, et ensuite de transformer ces informations en mouvement. On sait que la perception et l'action interagissent sans cesse (Creem-regehr & Kunz, 2010). Extraire les magnitudes (se représenter les quantités) de l'environnement est nécessaire pour l'action comme pour la perception (Rinaldi & Girelli, 2017). Pour rendre compte de ces interactions, Walsh en 2003 a proposé un système commun de magnitude des dimensions de temps, d'espace et de nombre pour l'action. Ce modèle a été étayé par une extraordinaire diversité d'expériences examinant ces liens entre les différentes magnitudes perceptives (pour des revues, voir Bueti & Walsh, 2009; Cantlon et al., 2009; Walsh, 2003; Winter, Marghetis, & Matlock, 2015; Wood et al., 2008). Il suggère une base cérébrale commune pour le traitement du temps, de l'espace, et des nombres, localisée dans le cortex pariétal (Bueti & Walsh, 2009). Cette proposition d'un système commun implique un code commun mental pour les dimensions quantitatives. Ce format représentationnel permet des transformations entre dimensions, et la mesure d'une magnitude en fonction d'une autre. Si ces translations sont possibles, c'est parce que ces magnitudes mentales sont toutes caractérisées par la loi de Weber lors des jugements perceptifs. Ce système commun devrait donc entraîner des effets de congruence entre les différentes magnitudes. Dans le chapitre suivant, le modèle ATOM sera développé et la place de l'action au sein du modèle sera particulièrement exposée dans le but de comprendre les relations entre perception et action au sein du modèle.

2 Un système commun de magnitude pour la perception des quantités, de l'espace et du temps

SOMMAIRE

2.1 Les prédictions du modèle ATOM 33

2.1.1 Hypothèse « plus A - plus B » 34

2.1.2 Modèles explicatifs des associations entre différentes magnitudes et des codes de réponse 38

2.1.3 La perception pour l'action 40

2.2 Le cortex pariétal dans la représentation des magnitudes 41

2.3 La place de l'action dans le modèle ATOM 45

2.3.1 Perception sur Action 45

2.3.2 Action sur Perception 49

2.1 Les prédictions du modèle ATOM

Pour rendre compte des interactions entre nombre, espace et temps sur l'action, Walsh en 2003 propose que ces trois dimensions soient traitées par un **système commun de magnitude**. La base de ce modèle repose sur l'idée que chacune de ces dimensions perceptives peut s'ordonner sur un continuum qui peut être appréhendé en termes de « plus que » ou « moins que » (e.g. « plus grand », « plus loin », « plus long »). Le modèle s'étend également à d'autres dimensions que le nombre, l'espace et le temps telles que la taille, la luminosité ou encore la distance. Ce système général de magnitude qui représente les dimensions numériques et certaines dimensions non-numériques a été étayé par de nombreuses études comportementales, neuropsychologiques et en neuro-imagerie cérébrale (voir Chapitre 1). Un des points fondamentaux du modèle réside dans l'idée que le traitement de ces dimensions quantitatives est nécessaire pour **guider les actions**. Il est important de noter que l'action est ici définie comme un mouvement, et que le modèle s'intéresse surtout aux conséquences sensori-motrices de ce mouvement. Par exemple, effectuer un mouvement vers un objet requiert l'intégration des dimensions spatiales (« à quelle distance »), numériques (« combien d'éléments ») et temporelles (« combien de temps ») (Winter, Marghetis, et al., 2015). Ainsi, pour attraper un tas de cacahuètes, le système moteur se sert des informations de distance et de taille de l'objet afin de définir les paramètres d'amplitude du mouvement et d'ouverture de la pince digitale.

Walsh (2003) propose que les **magnitudes perceptives** partagent un traitement similaire (Figure 2.1.b), par opposition aux modèles qui considèrent que chaque magnitude serait traitée de

façon indépendante et comparée selon sa propre métrique (Figure 2.1.a.). Walsh (2003) propose qu'elles aient aussi des similarités dans leur traitement pour l'action. Précisions que les nombres, au-delà de leur dimension sémantique, sont également considérés comme une magnitude perceptive puisqu'ils sont associés à une représentation non-verbale de la quantité (Whalen et al., 2012). De plus, l'intensité de la représentation suit la loi de Weber tout comme les autres dimensions physiques de temps, de taille ou d'intensité lumineuse. Cette similarité de traitement avec les autres dimensions nous amène à considérer la numérosité comme un attribut perceptif (Burr, Ross, Binda, & Morrone, 2010; Whalen et al., 2012).

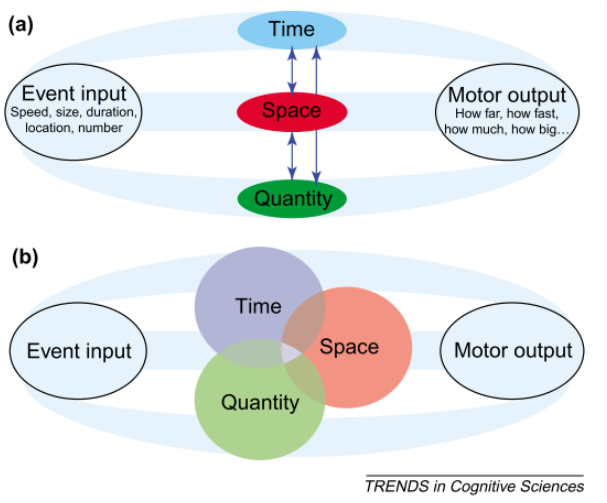

Figure 2.1 - Deux modèles de traitement de la magnitude. Dans la figure (a), les dimensions de temps, d'espace et de quantité sont traitées indépendamment et sont comparées selon leur propre métrique tandis que la figure (b) présente le modèle ATOM pour lequel la magnitude des trois dimensions est traitée selon une métrique commune. Figure tirée de Walsh (2003).

2.1.1 Hypothèse « plus A - plus B »

A la fin du chapitre précédent, nous avons vu qu'un système commun de magnitude implique que les différentes dimensions perceptives partagent des similitudes dans leur traitement mais aussi que des mécanismes de translation existent. Ainsi, le modèle prédit qu'un changement de magnitude dans une dimension influence la magnitude d'une autre dimension. Cette hypothèse, surnommée ***« plus A – plus B »***, signifie qu'une augmentation de la magnitude perçue d'une dimension *A* entraîne la perception de l'augmentation d'une autre magnitude *B*. A l'inverse, la diminution d'une magnitude *A* entraîne la perception de la diminution d'une autre magnitude *B*. A titre d'exemple, souvent, quand on demande aux enfants quel train est le plus rapide, ils répondent que c'est le train le plus long. La taille du train a donc affecté le jugement de la vitesse. Les enfants, spontanément, vont appliquer des règles telles que « *plus A – plus B* » qui peuvent mener à des erreurs. Très tôt, Piaget remarqua chez les enfants des erreurs de ce type dans des tâches dites de conservation du nombre

(Piaget, 1965). Une expérience connue consistait à présenter aux enfants une rangée de jetons étalon et un jeu de jetons d'une autre couleur. L'enfant avait pour tâche de placer le même nombre de jetons que dans la rangée étalon. Lorsque les jetons de la rangée étalon n'étaient pas espacés uniformément, les jeunes enfants commettaient l'erreur de mettre plus de jetons que le nombre exact. L'éloignement entre les jetons et donc la longueur de la rangée a induit les enfants en erreur. Vers 6-7 ans, avec l'éducation, ils ne font plus ce type d'erreurs. Pourquoi les enfants confondent-ils ces magnitudes ? En fait, ces erreurs sont indissociables de nos expériences sensorielles puisqu'elles correspondent souvent aux caractéristiques du monde réel : celui qui va le plus vite est souvent celui qui a les plus longues jambes, les distances les plus longues sont celles qui prennent le plus de temps, les gros objets sont souvent les plus lourds. Et ces exemples ne sont pas des cas isolés. Des études plus récentes ont montré que même les adultes étaient enclins à commettre ce type d'erreur perceptive (DeLong, 1981; Xuan, Zhang, He, & Chen, 2007). Une expérience, qui illustre bien ce mécanisme de translation, a été réalisée par Xuan et al. (2007). Les participants visionnaient deux ensembles de points avec un temps de présentation variable et leur tâche était de juger lequel des deux stimuli était présenté le plus longtemps. Dans la condition congruente, le stimulus qui était présenté pendant le temps le plus court (ou le plus long) était également celui qui avait le plus petit (ou le plus grand) nombre de points (voir Figure 2.2). La magnitude temporelle était donc congruente avec la magnitude numérique contrairement aux conditions incongruentes (temps court/grand nombre et temps long/petit nombre). Le taux d'erreurs rapporté était significativement plus petit dans la condition congruente que dans la condition incongruente. Le jugement temporel était également impacté lorsque la congruence concernait la taille d'un carré, sa luminance ou la grandeur d'un chiffre arabe (Figure 2.2).

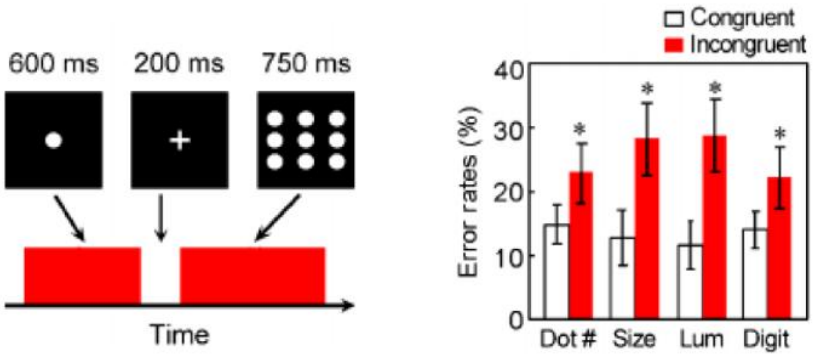

Figure 2.2 - A gauche, illustration d'un essai expérimental dans lequel la durée de présentation est congruente avec la magnitude numérique. Un premier ensemble de points est présenté pendant 600 ms, suivi d'une croix de fixation pendant 200 ms et ensuite du second ensemble de points pendant 750 ms. La tâche du sujet est de juger lequel des deux ensembles a été présenté le plus longtemps. Ici, le second stimulus est le plus grand numériquement et celui qui a été présenté le plus longtemps (i.e. situation congruente). A droite, les taux d'erreurs en pourcentages pour chaque condition congruente et incongruente selon la magnitude testée, qui peut être un nombre de points (« dot »), la taille physique d'un carré (« size »), la luminance d'un carré (« lum ») ou un chiffre (« digit »). Figure tirée de Xuan et al. (2007).

Le changement de la magnitude numérique a modulé la perception de la durée de présentation des stimuli entraînant une facilitation pour les conditions congruentes et une interférence pour les conditions incongruentes. Moins étudiée, la magnitude de l'espace interagit également avec celle du temps. Dans une étude de DeLong (1981), les participants devaient s'imaginer réalisant des activités quotidiennes telles que lire ou regarder la télévision, pendant 15 minutes assis dans une chambre,. Une maquette de cette chambre était présentée dans trois tailles différentes (échelles 1/6, 1/12 et 1/24). Les participants devaient appuyer sur un bouton lorsqu'ils pensaient que les 15 minutes s'étaient écoulées. Plus la pièce était petite, plus les participants avaient tendance à sous-estimer le temps passé dans la pièce. Ces résultats suggèrent que la perception du temps s'est ajustée à l'échelle spatiale de l'environnement.

Au niveau clinique, des données provenant de patients héminégligents ont également permis de mettre en exergue les liens étroits entre nombre et espace. Les patients souffrant d'une héminégligence droite et négligent donc leur champ visuel gauche ont tendance dans des tests de barrage de lignes à barrer uniquement les lignes se présentant sur la partie droite de leur feuille de travail. Dans des tâches de bissection de lignes (« diviser la ligne en son milieu »), ils négligent le côté gauche de la ligne et place le milieu plus à droite du centre géométrique. De façon intéressante, quand on leur demande oralement quel chiffre est situé au milieu entre 11 et 19, certains patients répondent 17 voire un chiffre en dehors de l'intervalle comme 21, ce qui suggère qu'ils ont également négligé la partie gauche de la ligne mentale numérique (Basso, Nichelli, Frassinetti, Pellegrino, & Patologia, 1996; Walsh, 2003). Ces résultats appuient l'idée que les magnitudes spatiales et numériques partagent des ressources communes et confirment l'existence d'une représentation orientée de gauche à droite des nombres (i.e. LMN). Par ailleurs, des résultats similaires ont été observés sur des patients héminégligents droits dans des tâches de bissection temporelle (Saj, Fuhrman, Vuilleumier, & Boroditsky, 2014). En effet, ces patients avaient des difficultés à associer l'espace gauche avec les événements du passé.

Les changements perceptifs de la prédiction « *plus A – plus B* » ont été étayés par des études testant les **effets de congruence**. Ces phénomènes sont reflétés par un traitement plus rapide quand les stimuli possèdent des caractéristiques congruentes parmi différentes dimensions (Riemer, Diersch, Bublatzky, & Wolbers, 2016). Habituellement, comme c'est le cas pour l'expérience de Xuan et ses collaborateurs (2007), les chercheurs tentent d'observer dans quels cas des conditions congruentes (ou incongruentes) de magnitude facilitent (ou interfèrent) le traitement perceptif. Les interactions qui sont les plus étudiées sont sûrement celles entre les magnitudes spatiale et numérique (de Hevia, Girelli, et al., 2014; Dormal, Larigaldie, Lefèvre, Pesenti, & Andres, 2018; Henik & Tzelgov, 1982; Winter, Matlock, Shaki, & Fischer, 2015). Par exemple, nous avons vu dans le chapitre 1 que la taille physique d'un chiffre (petit *vs.* grand), lorsqu'elle est congruente avec sa taille

numérique du chiffre permet de réduire le temps de traitement pour juger si ce chiffre est plus petit ou plus grand que 5 (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Linden, et al., 2007; Henik & Tzelgov, 1982). Dans ce cas, la dimension spatiale de taille interagit automatiquement avec la dimension numérique. L'effet SNARC que nous avons également développé dans le chapitre précédent expose plutôt une interaction entre les localisations spatiales et les nombres, que le modèle ATOM ne prédit pas directement (i.e**. associations entre magnitude et codes de réponse,** Riemer et al., 2016). Ces codes de réponse représentent les localisations spatiales gauche et droite et dépendent de la consigne de l'expérience. Des associations similaires ont été trouvées avec d'autres magnitudes que les nombres. Par exemple, le temps interagit aussi avec les localisations dans l'espace ; interaction qui est connue sous le nom d'effet STEARC *(Spatial TEmporal Association of Response Codes*, Ishihara, Keller, Rossetti, & Prinz, 2008). Les concepts temporels tels que avant/après ou passé/futur sont associés avec l'espace gauche et droit respectivement (Casasanto & Boroditsky, 2008; Hartmann, Martarelli, Mast, & Stocker, 2014), suggérant l'existence d'une « ligne mentale de temps » (Barsalou, 2008; Boroditsky, 2000; Casasanto & Boroditsky, 2008; Hartmann et al., 2014; Stocker, 2012). Plus largement, Walsh (2003) propose que ces interactions soient nommées effet SQUARC (*Spatial QUantity Association of Response Codes*) puisque le concept de quantité permettrait de regrouper toutes ces dimensions. L'association existe également pour les propriétés physiques de taille et de luminance d'un objet. Ren, Nicholls, Ma et Chen (2011) ont examiné dans une série d'expériences ces associations avec des stimuli variant en magnitude numérique (Expérience 1), en taille physique (Expérience 2), en luminance (Expérience 3), en taille conceptuelle d'un objet (Expérience 4) ou bien en intensité sonore (Expérience 5).

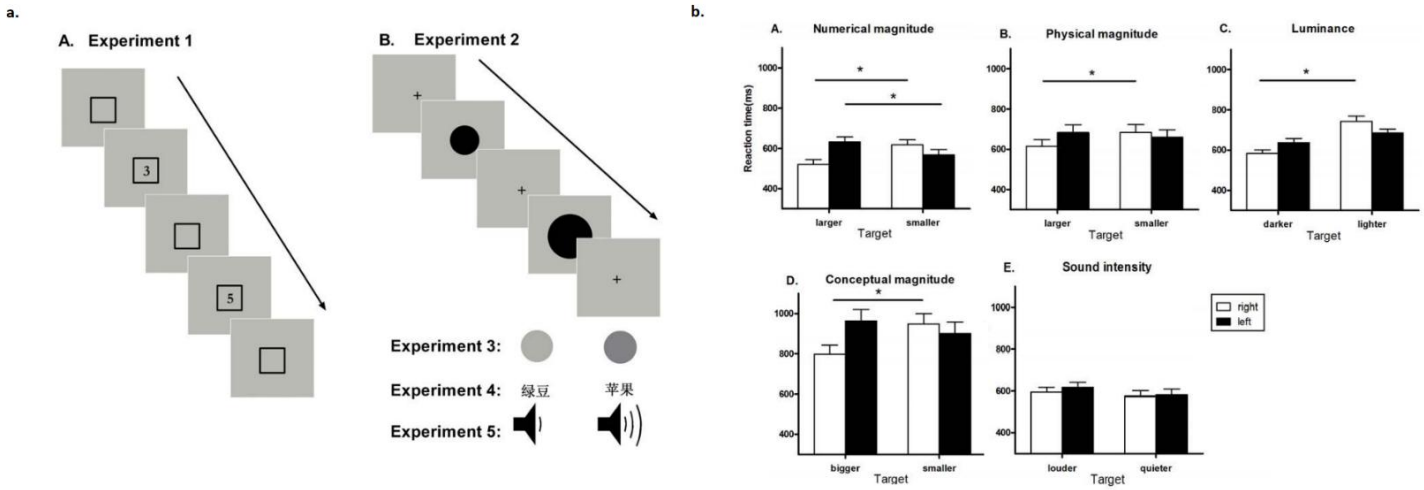

Figure 2.3 – La figure (a) illustre un essai expérimental en fonction de la magnitude testée (Exp1 : chiffres, Exp2 : taille physique, Exp3 : luminance, Exp4 : taille conceptuelle ; Exp5 : intensité sonore). Les participants doivent effectuer une tâche de comparaison de magnitude (second < ou > premier ?) en fonction de la dimension testée. En (b), les résultats pour chaque magnitude testée. On observe une interaction croisée entre la magnitude de la dimension testée et le côté de l'espace, hormis lorsque les stimuli varient en intensité sonore. Figure tirée de Ren et al. (2011).

La tâche des participants était d'indiquer le plus vite possible avec leur main droite ou leur main gauche si le second stimulus présenté était inférieur ou supérieur au premier, selon la dimension testée (Figure 2.3). Par exemple, dans l'expérience 1, ils devaient juger si le deuxième chiffre était numériquement supérieur ou inférieur au premier. Les résultats ont montré que les temps de réponse étaient plus rapides avec la main droite pour les stimuli plus grands en magnitude numérique, en taille, en luminance et en magnitude conceptuelle. Ils étaient plus rapides avec la main gauche pour les stimuli plus petits en magnitude numérique, en taille, en luminance et en magnitude conceptuelle. Cela suggère que les différentes magnitudes ont été traitées de façon similaire et directement associées à une localisation spatiale (gauche ou droite). Bien qu'aucun effet n'ai été trouvé sur l'intensité sonore, d'autres études rapportent une interaction entre les hauteurs tonales et la magnitude numérique (Hartmann & Mast, 2017; Lachmair et al., 2017). Les participants sont plus rapides, pour répondre à une tâche de jugement numérique ou de jugement d'intensité sonore, lorsque la magnitude numérique et l'intensité sonore du chiffre sont congruents (voie basse/petits chiffres, voix haute /grands chiffres) (Hartmann & Mast, 2017).

2.1.2 Modèles explicatifs des associations entre différentes magnitudes et des codes de réponse

Comment expliquer ces associations entre les différentes dimensions et des codes de réponse ? Une première hypothèse de **correspondance de polarité** a été proposée par Proctor et Cho (2006) qui repose sur la représentation asymétrique des dimensions des stimuli et des alternatives de réponses. Dans un couple d'adjectifs, on distingue un membre de polarité dite positive (en général le plus courant) et un membre de polarité dite négative. Cette dissociation binaire qui vient de la linguistique permet de définir la relation entre deux adjectifs antonymes. Le membre de polarité positive est défini comme le membre le plus « accessible » et permet à lui seul de décrire la dimension. Par exemple, « grand » et « large » sont deux membres de polarité positive et leur opposé « petit » et « étroit » sont de polarité négative puisqu'on emploie davantage les termes de grandeur ou de largeur dans le langage courant, plutôt que de petitesse ou d'étroitesse. Dans l'opposition droite-gauche, il existerait également une asymétrie basée sur le plus grand nombre de droitiers dans la population comme l'a proposé Waugh (1982). Par conséquent, être droitier est considéré comme étant la « norme » (dans le sens le plus attendu), associant « droite » à une polarité positive. De ce fait, la théorie de correspondance de polarité propose que les membres de même polarité soient traités plus facilement puisqu'ils « correspondent », entraînant des temps de réponse plus rapides et moins d'erreurs (à l'instar des effets de congruence). Les polarités

négatives (« petit », « avant ») sont donc traitées plus rapidement avec la main gauche de polarité négative également. A l'inverse, « grand » ou « après » sont traités plus rapidement avec la main droite, côté de l'espace associé à une polarité positive.

Un autre modèle qui permet d'expliquer ces associations entre magnitudes et côté de l'espace est le **modèle de double-route** (*dual-route model* en anglais), qui interprète l'effet SNARC comme un effet analogue à l'effet Simon (Gevers, Verguts, Reynvoet, Caessens, & Fias, 2006; J. R. Simon, 1969). Ce dernier décrit la tendance à être plus précis et plus rapide lorsque le côté de présentation d'un stimulus cible et le côté de la réponse sont congruents (J. R. Simon, 1969). Dans le cas de l'effet SNARC, le stimulus est présenté au centre de l'écran mais induit un déplacement de l'attention vers un côté de l'espace en fonction de sa magnitude numérique. Le modèle de double-route propose donc un chevauchement de la dimension spatiale associée à la magnitude numérique du chiffre et de la dimension spatiale de la réponse motrice activée (Gevers, Ratinckx, De Baene, & Fias, 2006). Il rend compte des effets d'association selon deux voies de traitement parallèle : une voie dite conditionnelle qui est directement liée à la tâche du sujet, une seconde voie dite inconditionnelle qui implique l'activation de la magnitude et de sa place sur la ligne mentale de nombres. La route conditionnelle active un côté de l'espace en lien avec la tâche demandée (e.g. appuyer à gauche ou droite en fonction de la parité du chiffre) pendant que la route inconditionnelle, plus automatique, active un côté de l'espace en fonction de la magnitude du chiffre. Si le côté de la réponse motrice, activée par la voie conditionnelle, est congruente avec la localisation spatiale activée par le chiffre dans la voie inconditionnelle, les temps de réponse sont réduits et la précision augmente. A l'inverse, quand le côté de la réponse motrice et celui activé par le chiffre sont incongruents, les temps de réponse augmentent et la précision diminue.

Pour conclure, les expériences présentées soutiennent l'idée d'un traitement similaire pour les dimensions de temps, d'espace, de nombre et toute autre dimension perceptive pouvant se quantifier. Le traitement de deux dimensions ayant un même ordre de grandeur entraîne une meilleure précision et une plus grande rapidité de jugement *(« petit A – petit B »*), tandis que le traitement de deux dimensions d'ordre de grandeur différent augmente les temps de réponse et affecte la précision *(« petit A – grand B »).* Cela suggère que ces dimensions sont fortement imbriquées entre elles. En revanche, on peut aussi observer une version plus linéaire des effets de magnitudes de type *« plus A – plus B »,* comme le prédit initialement Walsh (2003). Ces derniers font appel à la notion de sens (plus ou moins) et taille (combien en plus, combien en moins) du changement et non plus à une distinction qualitative (petit ou grand).

2.1.3 La perception pour l'action

Il semble évident que les informations spatiales et temporelles sont importantes pour l'action. La programmation de chaque mouvement nécessite une bonne estimation de l'espace et du temps comme pour attraper un objet, le pointer, le lancer. Bueti et Walsh (2009) proposent que l'information numérique est aussi nécessaire pour opérer la transformation sensori-motrice. Dans le modèle, l'action est considérée comme une sortie motrice, et reflète le traitement des magnitudes aux étapes de la planification et de la programmation du mouvement (Figure 2.1). Un grand nombre d'expériences étayant le modèle ATOM ont consisté à enregistrer des temps de réaction manuels. Néanmoins, les études chronométriques ne permettent pas de comprendre quel est l'impact du traitement des magnitudes perceptives sur le contrôle moteur.

Bien que moins souvent étudiés, d'autres paramètres de l'action en dehors des temps de réaction ont été considérés. Les études sur le contrôle manuel ont soutenu l'hypothèse selon laquelle la transformation sensori-motrice utiliserait les informations temporelles, spatiales ou numériques pour définir les paramètres moteurs du mouvement. Lindemann, Abolafia, Girardi, et Bekkering en 2007 font partie des premiers chercheurs à avoir fait l'hypothèse que si la cognition numérique et le contrôle moteur partagent des représentations cognitives de la magnitude, une information numérique devrait affecter la préparation ou l'exécution des réponses motrices (voir aussi Andres, Davare, Pesenti, Olivier, & Seron, 2004). Plus précisément, leur hypothèse était qu'on devrait observer non seulement des effets sur les temps de réaction mais aussi sur les paramètres cinématiques de l'action. Dans leur étude, les participants devaient effectuer une tâche de saisie de la partie fine ou épaisse d'un objet cylindrique avec (1) la pince pouce-index ou (2) la main entière, en réponse à la parité d'un chiffre (voir Figure 2.4).

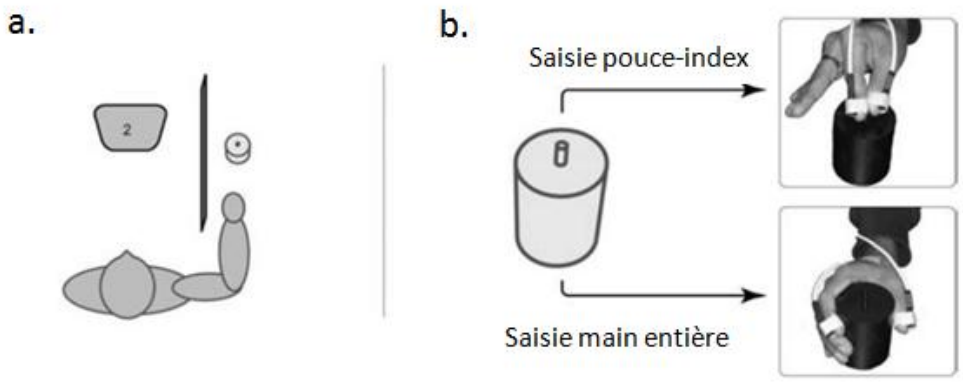

Figure 2.4 - Schéma expérimental de l'expérience de Lindemann et al., (2007). *(a) Les participants sont assis devant un écran affichant les chiffres 1,2,5, 8 et 9. L'objet ainsi que leur main droite utilisée pour la tâche de saisie sont cachés pour éviter d'avoir un retour visuel. (b) Saisie pouce-index : saisir l'objet sur sa partie fine. Saisie main entière : le saisir sur sa partie large. Figure adaptée de* Lindemann et al. (2007).

Les résultats ont montré que la tâche de saisie avec la pince pouce-index était associée à des chiffres de petite magnitude et la tâche de saisie avec la main entière à des chiffres de grande magnitude puisque les temps d'initiation du mouvement étaient plus courts dans ces conditions congruentes. De façon intéressante, la grandeur du chiffre a également impacté la taille de la pince digitale lors de la phase du transport de la main s'apprêtant à saisir l'objet avec la main entière : la taille maximale de l'ouverture de la pince était supérieure en réponse à de grands nombres. Un an plus tard, Andres, Olivier, et Badets (2008) montrent que la simple vision de nombres imprimés sur la face d'un objet modifie la taille de l'ouverture de la pince digitale.

Les associations entre nombre et espace ont également été observées avec d'autres effecteurs, comme par exemple sur les positions spontanées du regard. Placés dans l'obscurité, les participants devaient générer aléatoirement à voix haute des nombres entre 1 et 30 pendant que leurs mouvements des yeux étaient enregistrés (Loetscher & Nicholls, 2010). Les résultats de l'expérience ont montré que la position du regard pouvait prédire l'ordre de grandeur du chiffre qui allait être généré, par rapport au chiffre qui a été précédemment généré. Quand le regard était placé en bas à gauche, les volontaires avaient tendance à générer des chiffres inférieurs au chiffre précédent, tandis que lorsque le regard était plutôt vers le haut à droite, ils avaient tendance à générer des grands supérieurs au chiffre précédent. Le changement horizontal et le changement vertical de la position des yeux a prédit la direction du changement de magnitude du nombre au-dessus du niveau de la chance (il suit la prédiction de type « *plus A-plus B* » : augmentation sur axe vertical/horizontal – augmentation de la magnitude numérique). Cette expérience est un argument de plus en faveur de l'existence d'une association entre les nombres et les localisations spatiales de bas en haut (voir la section 1.1.2). D'autre part, des chercheurs ont montré un biais oculomoteur sur les micro-saccades (très petites saccades, inférieures à 1 degré d'angle visuel). Lorsque des participants devaient fixer un stimulus visuel au centre d'un écran (étude 1), le simple fait d'entendre des nombres (non pertinent pour la tâche de fixation oculaire) a induit une dérive oculaire vers la gauche ou vers la droite en concordance avec la localisation spatiale associée à la magnitude du chiffre (Myachykov, Ellis, Cangelosi, & Fischer, 2016). Cela suggère que le traitement automatique de magnitudes numériques mène à des interférences inévitables avec le contrôle oculomoteur. Des recherches plus approfondies sur les paramètres moteurs sont toutefois nécessaires pour comprendre comment les informations de magnitude impactent la transformation sensori-motrice (Rugani & Sartori, 2016).

2.2 Le cortex pariétal dans la représentation des magnitudes

Si des conséquences sensori-motrices du traitement des magnitudes perceptives s'observent au niveau comportemental, c'est qu'il existe probablement un chevauchement neuronal. Les études en neuro-imagerie mettent en évidence l'implication du **cortex pariétal** dans le traitement des

magnitudes du temps, de l'espace et des nombres (Binda, Morrone, Ross, & Burr, 2011; Bueti & Walsh, 2009; Coull & Nobre, 1998; Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene, 2005; Walsh, 2003). Certains auteurs ont proposé que la partie hIPS codait uniquement pour les nombres mais les données aujourd'hui sont davantage en faveur d'un codage pour le traitement de toutes les magnitudes continues (Pinel et al., 2004). Les jugements numériques activent systématiquement la région hIPS, mais cette aire ne serait pas seulement spécifique à cette dimension. En effet, elle est également impliquée dans les jugements spatiaux (Hubbard et al., 2005) et dans la perception temporelle (Coull & Nobre, 1998). Initialement, des études en IRMf qui impliquaient toutes des tâches de traitement numérique ont souligné le rôle de la région IPS dans la représentation interne des quantités numériques (Dehaene et al., 2003). Si elle est activée pour des dimensions non-numériques, c'est que le concept de quantité est également activé. Faillenot, Decety et Jeannerod (1998) reportaient déjà une activation du cortex intra-pariétal droit en réponse à des tâches de jugement de taille et d'orientation. Le cortex intra-pariétal s'activerait lors de comparaison de chiffres arabes, de longueur de lignes et d'angles (Fias, Lammertyn, Reynvoet, Dupont, & Orban, 2003), mais pas lors de comparaison de férocité d'animaux (Thioux, Pesenti, Costes, Volder, & Seron, 2005), suggérant que seules les magnitudes liées au temps, l'espace et aux nombres permettent une activation des aires intra-pariétales. En 2004, Pinel et ses collègues publient une expérience en IRMf dans laquelle ils comparent directement les activations cérébrales pendant que des participants effectuent des comparaisons de taille, de luminance ou de nombres. Les trois conditions ont activé la zone codant pour l'effet de distance dans la région IPS. Par contre, des segments adjacents à l'IPS ont été activés en fonction de la dimension. Le nombre a interféré avec la taille physique, cette dernière ayant interféré avec la luminance. Cependant, le nombre et la luminance n'ont montré aucune interférence. Cela suggère des activations cérébrales différentes pour ces dimensions. Le segment horizontal de la région IPS a été également plus activé pendant que les participants effectuaient la tâche de comparaison numérique. Bien que peu d'études aient directement comparé l'activation cérébrale en réponse à différentes magnitudes, un large panel de résultats a montré que les régions le long de la scissure intra-pariétale (illustré en Figure 2.5) répondaient à des stimuli de différentes tailles, intensités lumineuses, quantités numériques, et même pour des stimuli non-quantitatif mais qui peuvent s'ordonner comme les lettres de l'alphabet (voir Cantlon, Platt, & Brannon, 2009 pour une revue).

Les données sur les primates non-humains offrent également des connaissances sur le substrat neuronal codant pour la représentation des magnitudes. Plus spécifiquement, les études sur les macaques ont permis de montrer que des neurones seraient spécialisés dans le traitement de la magnitude, au-delà du traitement des nombres (Bueti & Walsh, 2009). Une étude a montré que des neurones de l'aire ventrale intra-pariétale (VIP) répondaient sélectivement à la longueur ou à la

numérosité des stimuli. Vingt pourcents des cellules répondaient pour les deux types magnitudes (Tudusciuc & Nieder, 2007). Alors que certaines cellules sont spécifiques à une magnitude, d'autres codent pour plusieurs magnitudes, ce qui suggère un chevauchement partiel des dimensions quantitatives, allant dans le sens de Pinel et ses collaborateurs (2004). Pour conclure, des neurones semblent coder une magnitude générique (Cantlon et al., 2009) alors que d'autres sont spécifiques d'une dimension (Shamma, 2001; Sur & Leamey, 2001). Ce code cérébral commun permettrait de soutenir au niveau neuro-anatomique l'hypothèse d'un traitement commun entre les différentes magnitudes, et d'expliquer les effets de congruence entre magnitudes. Les études sur les singes étayent aussi que ce système de magnitude commun est lié à l'évolution puisque les réponses comportementales et cérébrales sont très proches chez les primates humains et chez les primates non-humains.

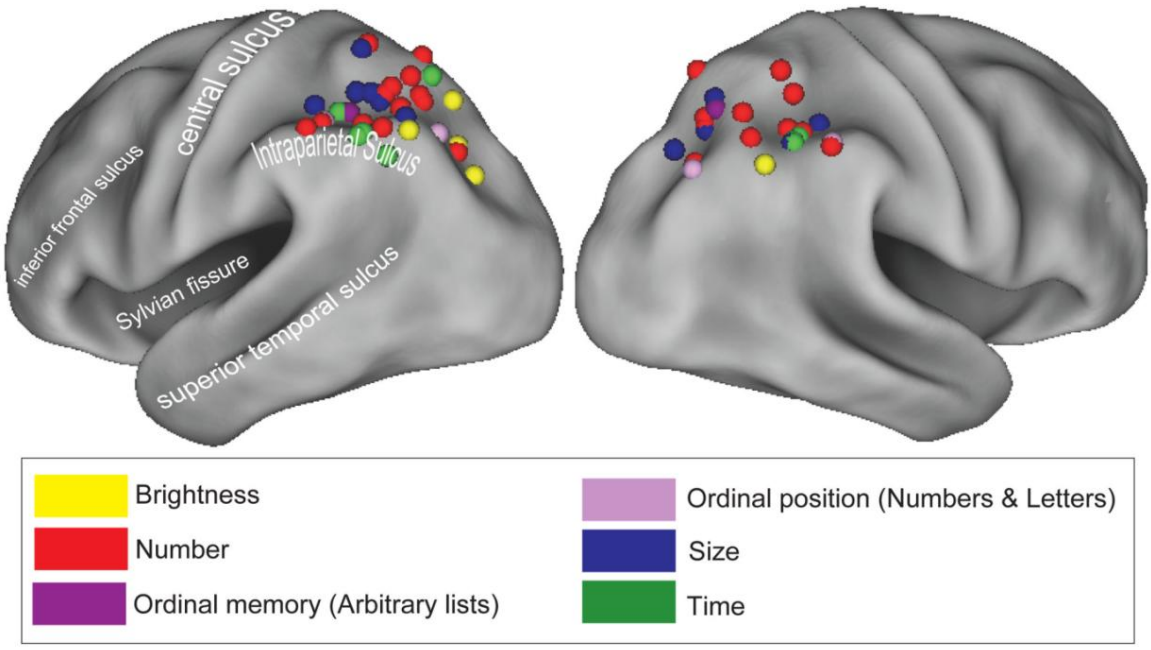

Figure 2.5 - Activation du cortex pariétal en réponse à différentes magnitudes. Chaque point représente des coordonnées pariétales. Number = nombre. Time = temps. Brightness = luminosité. Size = Taille. Ordinal memory = mémoire ordonnée) ; Ordinal position = position ordonnée. Figure tirée de Cantlon et al. (2009).

Au niveau neuropsychologique, si le traitement des informations spatiales, temporelles et numériques partagent bien des aires communes, alors des lésions du lobe pariétal pourraient entraîner des déficits au niveau des représentations quantitatives (Basso et al., 1996; Walsh, 2003; Zorzi et al., 2012) :

- Il a été montré que des lésions du lobe pariétal altèrent les jugements numériques. Pour rappel, IPS s'active chaque fois que nous réfléchissons aux nombres.
- Concernant la perception du temps, elle serait sous-tendue par une partie du cortex pariétal inférieure. Des lésions de cette zone entraîne des déficits dans le traitement temporel mais

également spatial. Par exemple, une étude a montré qu'un patient héminégligent avait tendance à surestimer les durées présentées dans le champ négligé (Basso et al., 1996).

En général, les études rapportent qu'un déficit dans le cortex pariétal entraîne des troubles dans la perception de plusieurs dimensions quantitatives. A ces troubles s'ajoutent des difficultés pour utiliser l'information visuelle qui guide les mouvements de saisie d'un objet et de pointage. En effet, le cortex pariétal est également connu pour son implication dans le raisonnement visuo-spatial, l'attention et pour le contrôle des mouvements (Corbetta & Shulman, 2002; M.A Goodale & Milner, 1992; Grefkes & Fink, 2005). Il fait partie d'un ensemble de régions spécialisées pour l'espace et la motricité, qui existent également chez le singe.

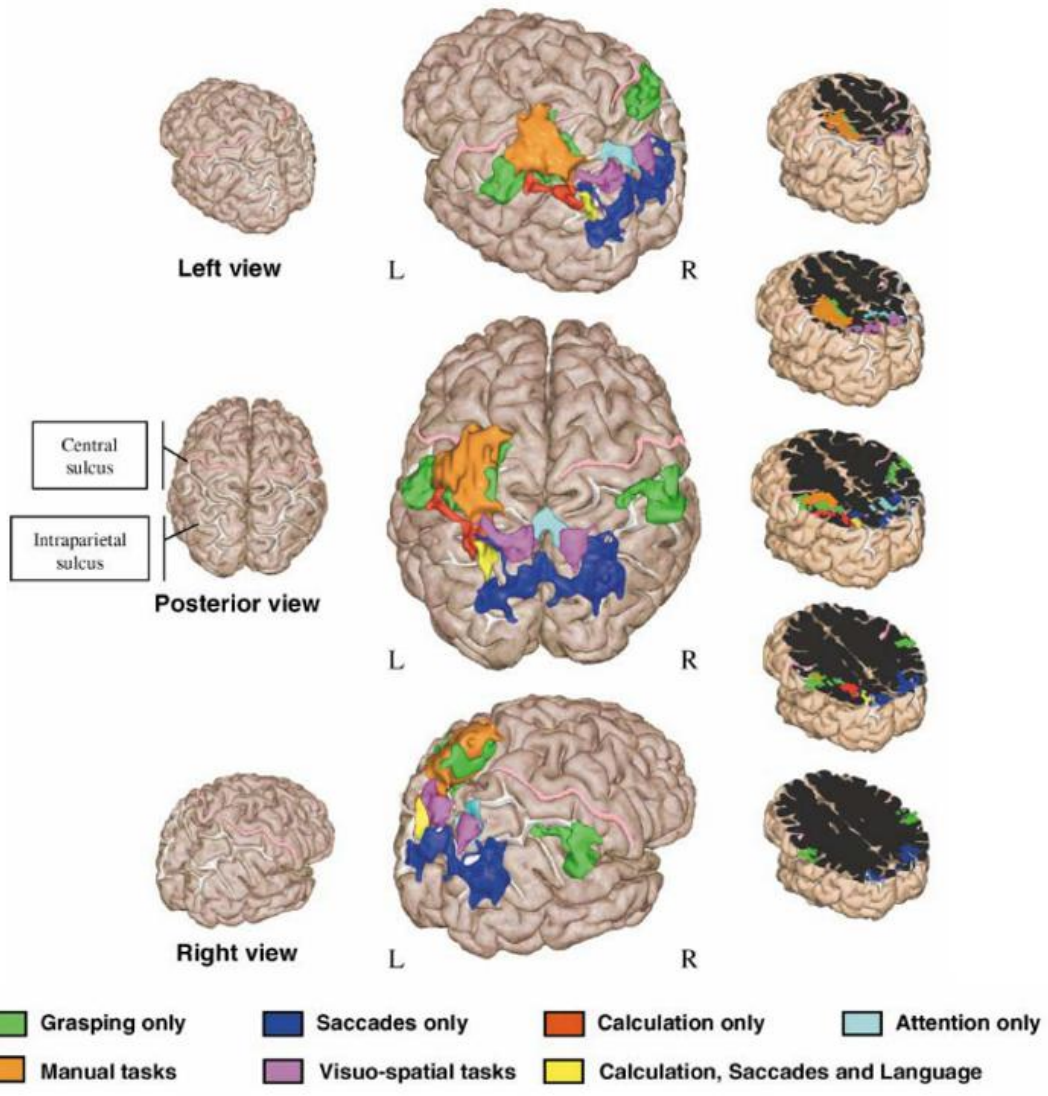

Figure 2.6 - Activation cérébrale liée à différentes tâches spécifiques et multitâches. Central sulcus = scissure centrale. Intraparieal sulcus = scissure intrapariétale. Posterior et right view = vue postérieure et droite. Grasping, Saccades, Calculation, Attention only = tâches spécifiques de saisie, de saccades, de calcul et d'attention. Manual and visuo spatial tasks = tâches manuelles ou visuo-spatiales. Calculation, Saccades and Language = Calcul, saccades et langage. Figure tirée de Simon et al. (2002).

Puisque ces régions spécialisées dans le traitement des magnitudes perceptives sont partagées du moins partiellement par des régions impliquées dans la programmation motrice, cela suggère que la perception et l'action sont étroitement liées et peuvent interagir (Culham & Valyear, 2006; Piazza & Eger, 2016; Rossetti et al., 2003; Walsh, 2003, cf. Figure 2.6).

2.3 La place de l'action dans le modèle ATOM

2.3.1 Perception sur Action

Dans le sens commun, une action caractérise un ensemble ou une séquence de mouvements effectués dans un but précis. Par exemple, boire de l'eau nécessite la mise en place de plusieurs mouvements, le premier étant de saisir le verre d'eau. Traverser la rue aussi requiert d'effectuer une série de mouvements sur une plus longue période temporelle. Ces actions nécessitent d'ailleurs souvent la coordination de différents effecteurs (mains, pieds, yeux). Dans le modèle ATOM, l'action est plutôt définie comme un mouvement à court-terme d'une durée de quelques millisecondes à quelques secondes. Elle se distingue en ce sens des séquences de mouvements plus complexes. Dans ce cadre, l'action est réduite à sa plus simple expression et concerne donc surtout l'étude des paramètres d'un mouvement. Généralement, cela correspond aux données d'un seul effecteur. Walsh (2003) se place d'ailleurs dans le cadre de l'étude des conséquences sensori-motrices immédiates du traitement des magnitudes : *« I am more concerned with proximal sensorimotor consequences of processing magnitude. »* (p.483). Il faut noter qu'un mouvement dirigé vers un objet repose toujours sur une transformation sensori-motrice (TSM, voir Encadré 1.1). Le modèle ATOM propose donc que l'intégration des informations spatiales, numériques et temporelles serve à guider le mouvement. S'il paraît évident que la transformation sensori-motrice exploite les informations spatiales, numériques et temporelles, on peut se questionner sur ce lien qui existe entre ces magnitudes et le mouvement.

Si ces magnitudes sont intégrées lors de la TSM, on devrait observer leur impact sur les **paramètres temporels** (temps de réaction) **et cinématiques** (amplitude, vitesse, pic d'accélération) du mouvement. La plupart des études ont montré des conséquences sur les paramètres temporels

Encadré 1.1 : La transformation sensori-motrice (TSM) d'un mouvement dirigé vers un objet

La TSM est définie par la transformation d'informations sensorielles en coordonnées motrices qui caractérisent le mouvement. Planifier un mouvement vers un objet nécessite d'identifier un stimulus et ses différentes caractéristiques et de le situer dans l'espace par rapport à son propre corps. Une réponse motrice doit ensuite être sélectionnée. Le cortex moteur détermine les paramètres de direction, de force et de durée requises pour effectuer le mouvement le plus adapté à l'objectif. Cette étape dépendra du contexte, comme les contraintes environnementales, la consigne et l'expérience personnelle. Une fois le programme moteur sélectionné, les muscles reçoivent les informations qui permettront la contraction musculaire et donc l'exécution du mouvement.

du mouvement. Par exemple, les effets de congruence s'observent essentiellement sur des temps de réaction et des taux d'erreurs : le traitement est facilité lorsque deux magnitudes perceptives sont de même ordre (e.g. effet de congruence de taille). Les effets d'associations entre un côté de l'espace et les autres magnitudes sont également essentiellement observés par des temps de réaction plus courts (e.g. effet SNARC). Néanmoins, ces effets ne sont que peu souvent étudiés sur les paramètres cinématiques du mouvement.

Il paraît évident que la magnitude de distance et de taille, qui sont des informations spatiales, soient cruciales pour la programmation du mouvement. Effectuer un mouvement de saisie, comme pour attraper un objet, requiert de localiser cet objet et déterminer sa taille et son poids afin de calculer un vecteur moteur précis. Nous avons vu dans le premier chapitre que les magnitudes perceptives sont souvent corrélées entre elles dans la vie de tous les jours. De façon similaire, la magnitude du mouvement semble aussi corrélée avec les informations numériques, spatiales ou temporelles (Gandini, Lemaire, & Dufau, 2008; Gentilucci, Benuzzi, Gangitano, & Grimaldi, 2001; Watson, Maylor, & Bruce, 2007). Par exemple, quand on explore une scène visuelle en situation écologique, le nombre de fixations et de saccades va augmenter avec le nombre d'items à explorer ou bien avec la taille de la surface à explorer (Figure 2.7.a). Le comportement oculaire s'adapte donc à la taille de la scène visuelle.

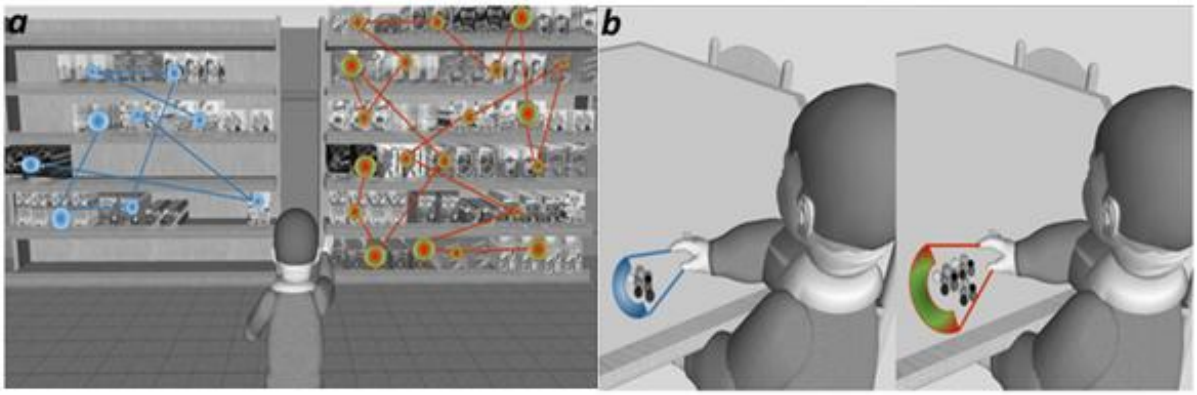

Figure 2.7 – Corrélation entre les magnitudes motrices et (a) les informations spatiales et (b) numériques. Figure tirée et adaptée de Rinaldi & Girelli (2017).

Si des informations de taille et de distance impactent la programmation d'un mouvement, on peut se demander comment un chiffre, qui est une information numérique de quantité abstraite et qui ne semble pas nécessaire à la programmation motrice, peut modifier les paramètres du mouvement ? Les effets du nombre symbolique ont été largement illustrés par des méthodes chronométriques, mais restent moins étudiés sur les paramètres moteurs des mouvements. Pourtant, considérer les conséquences des représentations cognitives sur le mouvement serait nécessaire à la compréhension de ces représentations (Gallese & Lakoff, 2005). Par exemple, l'ouverture de la main est corrélée avec la taille de l'objet à attraper, quand ce dernier est une

numérosité (Olivier, Davare, Andres, & Fadiga, 2007, Figure 2.7.b). En revanche, une information de magnitude, non pertinente pour effectuer ce type de tâche, peut-elle également moduler l'ouverture de la main ? Une des premières études à s'être intéressée à l'impact d'un chiffre sur les paramètres cinématiques du mouvement est celle de Lindemann et ses collègues (2007) présentée en section 2.1.3. La magnitude du chiffre a directement impacté la taille de l'ouverture maximale de la pince digitale lors de la phase de transport de la main vers l'objet. Ces résultats viennent conforter les études soulignant l'impact d'une information sémantique sur le mouvement. En effet, le simple fait de percevoir le mot « long » comparé au mot « court » imprimé sur un objet à saisir entraîne une augmentation du pic d'accélération, du pic de vitesse et du pic de décélération du mouvement réalisé pour atteindre cet objet (Gentilucci & Gangitano, 1998). Des informations de taille (e.g. « pomme » *vs.* « raisin ») ou de magnitude numérique (e.g. « 1 » *vs.* « 8 ») entraînent également des modifications des paramètres de saisie (Andres, Ostry, Nicol, & Paus, 2008; Glover, Rosenbaum, Graham, & Dixon, 2004). Les objets avec un grand chiffre imprimé dessus entraînent une plus grande ouverture de la pince digitale que celle pour saisir des objets avec un petit chiffre (Andres, et al., 2008). Cette différence d'ouverture s'observe dans les étapes initiales du mouvement et diminue progressivement à mesure que la main se rapproche de l'objet pour coïncider au final avec la taille réelle de l'objet. Pour résumer, des nombres symboliques, bien que non pertinents pour effectuer une tâche de saisie, affectent précocement les mouvements de saisie (voir Andres, Olivier, et al., 2008 pour une revue). On sait donc aujourd'hui que le mouvement de saisie est sensible à des informations sémantiques telles que les nombres (Badets, Bidet-Ildei, & Pesenti, 2014; Badets & Pesenti, 2010; Grade, Badets, & Pesenti, 2017; Lindemann et al., 2007) mais ne l'est pas pour des magnitudes ordonnées non-numériques comme les lettres de alphabet (Badets, Andres, Di Luca, & Pesenti, 2007; Badets, Boutin, & Heuer, 2015).

Les informations numériques modulent également le choix de la réponse (Daar & Pratt, 2008; Salvaggio et al., 2018) et les trajectoires du mouvement (Chagas, Dotan, Piazza, & Dehaene, 2017; Dotan & Dehaene, 2013; Ganor-Stern & Goldman, 2015; Song & Nakayama, 2008). Dans une de ces études, illustrée Figure 2.8, un carré central contenant un chiffre était présenté sur un écran entre deux carrés périphériques. Les participants devaient réaliser une tâche de pointage en atteignant avec leur index le carré présenté à gauche pour des chiffres inférieurs à 5, le carré central pour le chiffre 5 et le carré présenté à droite pour des chiffres supérieurs à 5. L'enregistrement de la trajectoire a montré une plus grande déviation vers le carré central pour des chiffres proches du standard 5. Cet effet de distance a été rapporté dans les phases initiales et finales du mouvement. On pourrait se poser la question de savoir si cet effet persiste lorsque que les petits chiffres sont associés avec le carré gauche et les grands chiffres avec le carré droit, mais les auteurs n'ont

malheureusement pas testé la relation inverse. On peut toutefois supposer que l'effet serait moins fort si la localisation spatiale associée aux nombres n'était pas congruente avec la LMN.

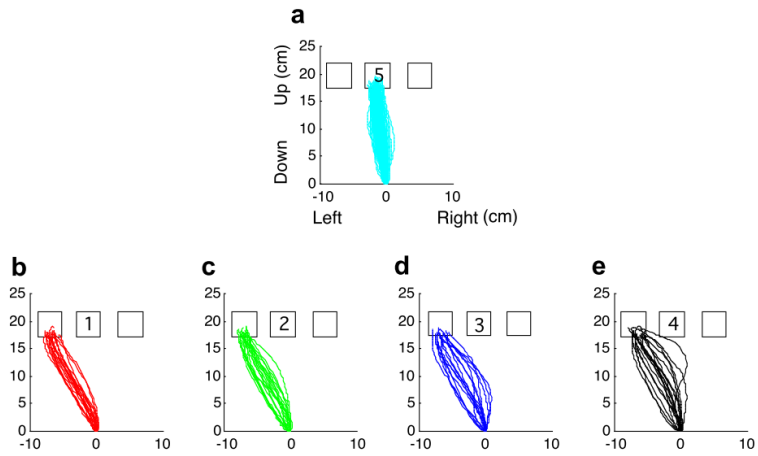

Figure 2.8 – Exemple de trajectoire manuelle d'un participant pour (a) le chiffre standard 5 et (b-e) les chiffres inférieurs à 5. L'axe vertical correspond à la dimension bas-haut et l'axe horizontal à la dimension gauche-droite. Figure tirée de Song et Nakayama (2008).

Concernant l'amplitude du mouvement, une récente étude a montré qu'elle pouvait être modifiée en fonction de la magnitude numérique (Fischer, Fischer, Huber, Strauß, & Moeller, 2018). La tâche des participants était simplement de déplacer avec leur index une croix centrale présentée sur une tablette vers la gauche ou vers la droite selon la parité du chiffre (tâche 1) ou en fonction de sa magnitude par rapport au standard 5 (tâche 2). Au-delà de l'effet SNARC classique, les auteurs ont montré un effet sur l'amplitude de type « *plus A- plus B* », à savoir une plus grande amplitude pour les grands chiffres. En 2004, Fischer, Warlop, Hill, et Fias s'étaient intéressés à l'amplitude des saccades dans un protocole où les participants devaient effectuer un mouvement des yeux vers la gauche ou vers la droite en fonction de la parité d'un nombre présenté au centre de l'écran. Ils devaient viser la position d'une cible présentée au préalable. Cette position était par conséquent maintenue en mémoire et le protocole induisait des saccades guidées par la mémoire. Aucun effet n'avait été trouvé sur l'amplitude alors que les latences des saccades révélaient un effet SNARC classique. Pourtant, les auteurs ont rapporté que l'amplitude des chiffres proches de 5 tendait à être plus courte que celle des chiffres éloignés de 5 (p<0.08). Dans les **Articles 2 et 3** de cette thèse, nous avons tenté d'éclaircir ce point, à savoir, déterminer si l'amplitude de la saccade est impactée ou non par une information numérique et, si oui, dans quelles conditions.

Pour conclure, la planification et l'exécution du mouvement semblent être influencées par les différentes magnitudes perceptives. Les effets sur les paramètres moteurs demandent toutefois des analyses plus poussées. Dans cette thèse, le premier axe de recherche est d'étudier comment la perception des magnitudes numériques peut influencer les paramètres temporels de l'action (i.e. latence saccadique) mais surtout spatiaux (i.e. amplitude saccadique) des saccades.

2.3.2 Action sur Perception

Si le système perceptif est directement lié au système moteur comme le suggèrent les études en imagerie cérébrale, la question d'une influence bidirectionnelle prend toute sa place. Dans le modèle ATOM, cette question n'est pas abordée. L'action (ici, le mouvement) est considérée comme une sortie motrice, en réponse à une stimulation visuelle. Les informations sensorielles sont fondamentales pour agir correctement sur notre environnement. En revanche, une grande question en psychologie cognitive repose sur les interactions réciproques entre perception et action, même si le lien étroit entre les deux a déjà été largement démontré (voir Creem-regehr & Kunz, 2010 pour une revue). Certaines théories stipulent que l'un conditionne l'autre, réciproquement. Agir sur un objet modifie sa perception et sa représentation est modifiée selon le mouvement effectué dessus. Berkeley (1709) soutenait déjà le rôle de l'expérience dans tous les aspects de la perception (vision ou tactile). Selon lui, le mouvement permettrait également d'estimer des distances puisque la distance perçue résulterait d'un apprentissage de la magnitude des paramètres moteurs nécessaires pour effectuer la tâche sur l'objet. Directement en lien, les théories idéomotrices proposent que les représentations d'un action s'organisent en fonction des connaissances des conséquences de cette action sur l'environnement. L'action serait donc intrinsèquement reliée à ses effets perceptifs (voir Shin, Proctor, & Capaldi, 2010 pour une revue). Selon la théorie du codage des événements (*theory of event coding* en anglais), action et perception partageraient un système de représentation commun (Hommel, 2009). Donc certains chercheurs ont déjà envisagés cette relation inverse bien que peu fassent le lien avec le système de magnitude commun pour l'action et la perception proposé par Walsh (2003). Dans un contexte de mouvement « simple », on trouve cependant quelques exemples d'une interaction réciproque. Préparer un mouvement de saisie peut faciliter la détection et la discrimination d'un stimulus visuel lorsque l'orientation de l'objet à saisir est congruente avec le mouvement à effectuer (Craighero, Fadiga, Rizzolatti, & Umiltà, 1999). En lien avec la cognition numérique, des chercheurs ont montré un biais du mouvement de la tête sur la génération aléatoire de nombres (Loetscher, Schwarz, Schubiger, & Brugger, 2008). En effet, lorsque les participants doivent générer les yeux fermés des chiffres entre 1 et 30, tourner préalablement la tête à gauche ou à droite modifie le choix du nombre généré. Notons que la moitié des participants avait reçu pour consigne de visualiser les chiffres sur une règle interne. Ce mouvement de rotation de la tête est connu pour entraîner une réallocation de l'attention spatiale vers un côté de l'espace. Au-delà du déplacement de l'attention spatiale, ces données suggèrent que l'attention s'est également déplacée sur la ligne mentale de nombre entraînant la génération d'un petit ou d'un grand chiffre selon la direction de la tête. Ces résultats ont été étendus à la direction du mouvement du bras et à des effets de congruence entre mouvement du bras et de la tête (Cheng, Ge, Andoni, Ding, & Fan, 2015).

De plus, l'équipe de Burr et Morrone a publié un nombre important d'études proposant une métrique commune pour la perception et les saccades oculaires (voir Burr, Ross, Binda, & Morrone, 2010 pour une revue). Ils ont montré que la génération d'une saccade impacte de façon similaire les dimensions d'espace, de nombres et de temps. Dans leurs expériences, ils ont flashé brièvement un stimulus au moment de l'exécution de la saccade. Les résultats ont montré des erreurs de localisation du stimulus flashé en direction de la cible saccadique (Morrone, Ross, & Burr, 2009; Ross, Morrone, & Burr, 1997). Les auteurs ont conclu que cette erreur était due à une compression saccadique de l'espace visuel, c'est-à-dire à une sous-estimation de la distance entre le stimulus et la cible. Cette compression saccadique est effective dès lors que le stimulus est flashé juste avant ou pendant le déclenchement de la saccade. Lorsqu'un ensemble de points assez conséquent est flashé et qu'on demande aux participants d'estimer la numérosité, une sous-estimation est systématiquement rapportée à condition que cet ensemble ait également été flashé juste avant ou pendant la saccade (Binda et al., 2011). Plus étonnant encore, les réponses à des opérations mathématiques sont pareillement modulées par l'exécution d'une saccade lorsque les nombres symboliques sont présentés très brièvement juste avant l'initiation de la saccade (Binda, Morrone, & Bremmer, 2012). Des résultats similaires avec la dimension temporelle ont permis de corroborer l'idée que ces trois dimensions sont intrinsèquement liées et sous-tendues par des mécanismes communs, puisque générer une saccade les impacte de la même façon.

Le second axe de recherche de cette thèse est d'explorer les relations réciproques entre action et perception au sein du modèle ATOM. Si action et perception partagent un système de métrique commun, modifier la magnitude motrice devrait également impacter la perception des magnitudes numériques, spatiales et/ou temporelles. De façon plus générale, cette thèse vise à explorer le réseau commun que partagent les nombres et le contrôle oculomoteur. Ce système moteur est couramment utilisé pour rendre compte de notre fonctionnement perceptif et cognitif. Le nombre d'études qui fait le lien entre le traitement du nombre et le système oculomoteur augmentent, et cette thématique a même fait l'objet d'un symposium à Rome en 2015 lors de la Conférence Internationale de Cognition Spatiale intitulée « Les nombres dans les yeux de celui qui observe : ce que les mouvements des yeux nous disent de la cognition numérique » (traduit de *« Numbers in the eye of the beholder : What eye movements reveal about numerical cognition »*). Dans la seconde partie de l'introduction, nous définirons les spécificités du système moteur saccadique qui présente la particularité (contrairement aux autres effecteurs), en raison de la rapidité des mouvements oculaires, de ne pas corriger le mouvement en cours d'exécution. Nous présenterons aussi les quelques études faisant le lien entre la saccade et le traitement numérique, spatial et temporel et développerons comment les connaissances du système oculomoteur peuvent être utilisées pour examiner quelle est la place de l'action dans le modèle ATOM.

LE SYSTEME SACCADIQUE DANS L'ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE PERCEPTION ET ACTION

La mission fondamentale de nos cinq sens est d'assurer l'interaction avec l'environnement. Partagée aussi par d'autres espèces, la vision est sûrement chez l'être humain le sens le plus utilisé puisque c'est celui que nous utilisons le plus pour prendre connaissance du monde extérieur. Les informations visuelles, associées aux informations en provenance des autres modalités sensorielles, nous permettent de comprendre cet environnement et d'agir dessus. Percevoir le monde en couleurs, capter les mouvements, identifier un objet et ses caractéristiques sont des activités très communes pour notre système visuel et qui ne demandent pas d'effort apparent. Pourtant, derrière ces activités quotidiennes, il existe de nombreux mécanismes complexes qui assurent une perception stable en permanence. L'information visuelle parcourt un long chemin (bien que très rapidement) avant d'être interprétée. Les relations entre le regard, le cerveau et la pensée sont multiformes. Dans cette partie, nous décrirons les caractéristiques et spécificités de l'œil, du système visuel et plus particulièrement du mouvement oculaire saccadique. Ce mouvement est très fréquent puisque nous réalisons 2 à 5 saccades oculaires par seconde. Nous nous intéresserons au fonctionnement de la saccade et aux paramètres spatio-temporels qui la caractérisent. Le système saccadique est donc pris ici comme modèle du système moteur afin d'étudier les interactions entre perception et action. Dans un dernier chapitre, seront présentées les études faisant le lien entre le système saccadique et la perception des magnitudes numériques, spatiales ou temporelles. Pour finir, nous verrons comment la connaissance du système saccadique et de ses protocoles expérimentaux peut contribuer à la compréhension de ce lien entre perception et action.

3 La perception visuelle et le système saccadique

SOMMAIRE

3.1 CARACTERISTIQUES DE L'ŒIL ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION VISUELLE 53

3.2 LA SACCADE OCULAIRE 56

3.2.1 La transformation sensori-motrice pour la saccade 58

3.2.2 Modèle fonctionnel de génération des saccades de Findlay et Walker (1999) 59

3.2.2.1 La latence : quand partir 61

3.2.2.2 L'amplitude : où aller 63

3.1 Caractéristiques de l'œil et traitement de l'information visuelle

Comme tout système sensoriel, la vision reçoit les informations provenant du monde extérieur par un organe sensoriel, ici l'œil. Les ondes lumineuses, réfléchies par les objets, entrent dans l'œil par la pupille et stimulent les récepteurs sensoriels qui tapissent le fond de l'œil au niveau de la rétine. La rétine est cartographiée en deux parties : une région centrale et une région périphérique. Les cellules réceptrices, présentes en régions centrale et périphérique de la rétine, sont appelées photorécepteurs et se situent dans la première couche cellulaire de la rétine en profondeur. Elles permettent la conversion de la lumière en influx nerveux. On distingue les cônes des bâtonnets, se dissociant par leur sensibilité à la lumière et se répartissant de manière inégale sur la rétine (voir Figure 3.1).

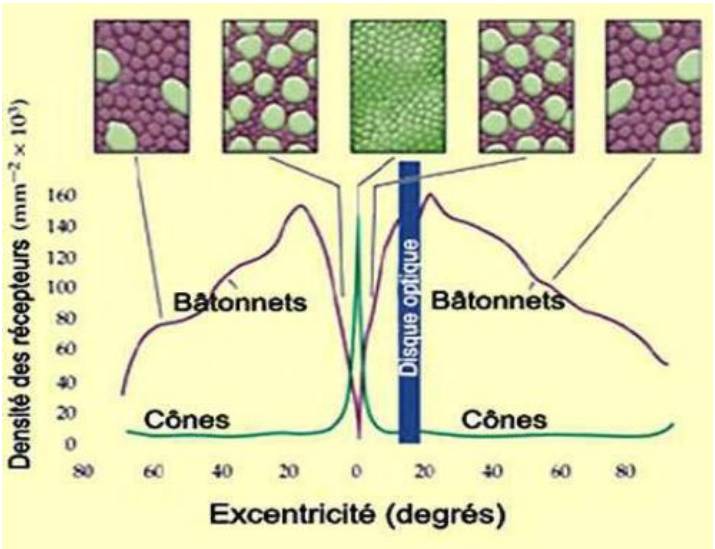

*Figure 3.1 - Répartition des photorécepteurs sur la rétine. Densité des cônes (en vert) et des bâtonnets (en violet) selon le degré d'excentricité rétinienne en degrés d'angle visuel. Le disque optique correspond à la zone de tâche aveugle où aucun photorécepteur n'est présent et qui constitue la sortie des axones formant le nerf optique. Tiré de :*Purves et al., 2005, p.244.

Les cônes sont des cellules qui codent pour la vision colorée et répondent pour des luminosités fortes. Bien qu'ils ne représentent que 5% des photorécepteurs, ils permettent une vision détaillée et précise du champ visuel. En raison de leur grande densité en fovéa, région centrale de la rétine couvrant environ 1 à 2° d'angle visuel, cette partie a été estimée comme étant la zone d'acuité visuelle maximale. Un éloignement de la fovéa entraîne une perte d'acuité rapide.

Les 120 millions de bâtonnets en périphérie assurent la vision scotopique, qui permet la vision lorsque la luminosité est faible. Ils sont sensibles aux mouvements de faibles contrastes de luminance et permettent de détecter des stimuli dans la vision périphérique. Absents en zone fovéale, leur densité croît avec l'excentricité rétinienne (l'éloignement par rapport à la fovéa).

Les photorécepteurs de la première couche cellulaire de la rétine transmettent l'influx nerveux aux neurones bipolaires de la deuxième couche cellulaire (couche nucléaire interne) puis aux cellules ganglionnaires de la troisième couche (couche ganglionnaire) dont les axones constituent le nerf optique qui transmet les informations au cortex visuel par différents relais. 80 à 90% des fibres vont se projeter dans les corps genouillés latéraux via le nerf optique, le chiasma optique et le tractus optique : c'est la voie rétino-géniculo-striée. Ce n'est que plus tard que l'information est transmise au niveau du cortex visuel primaire (illustré en Figure 3.2). Cette voie permet le traitement des informations visuelles, contrairement à la voie rétino-tectale dans laquelle les 10% de fibres restantes projettent directement dans le colliculus supérieur (CS). La voie rétino-tectale est responsable des mouvements réflexes d'orientation de la tête vers un stimulus apparu brusquement en périphérie ou vers un stimulus en mouvement. Notons que le colliculus supérieur (CS) est un passage obligatoire pour l'exécution d'un mouvement des yeux car il permet la transformation sensori-motrice (TMS, voir aussi la section 3.2.1), le cortex visuel lui n'est pas indispensable. La reconstruction de l'image commence dès la réception de l'information visuelle par les cellules ganglionnaires de la rétine qui organisent l'espace visuel selon leur nombre de photorécepteurs connexes. Chaque cellule ganglionnaire couvre des parties de notre champ visuel de différente taille. Au niveau de la rétine centrale, un petit nombre de photorécepteurs est lié à une même cellule ganglionnaire, contrairement à la périphérie pour laquelle un grand nombre de photorécepteurs est lié à une même cellule. Par conséquent, les cellules ganglionnaires en périphérie codent pour de plus grands champs récepteurs, mais l'acuité visuelle diminue en contrepartie.

Cette organisation de l'espace visuel est préservée au niveau du cortex visuel primaire (V1) puisqu'une correspondance point par point est réalisé, où chaque élément du champ visuel garde sa position par rapport aux autres éléments : c'est le principe de **rétinotopie**. Cependant, en zone fovéale, comme un grand nombre de neurones code pour un champ récepteur plus restreint, cela entraîne une sur-représentation de cette zone au niveau des cartes visuelles (qui sont les couches superficielles des cellules du CS). Ce phénomène de « **magnification corticale** » (Cowey & Rolls, 1974,

Schira, Wade, & Tyler, 2007; Van Essen, Newsome, & Maunsell, 1984, voir Tableau 3.1) traduit cette relation entre l'excentricité, par rapport à la fovéa, et la taille du champ récepteur. Ainsi, un objet perçu en fovéa sera traité par plus de neurones qu'en périphérie, et sera sur-représenté sur la carte visuelle du niveau de V1 dans le cortex occipital.

Eccentricity degrees	0	1	3	5	7	10	15	20	30	40	60	70
Magnification factor, mm/degree.	15.1	8.3	4.16	3.08	2.1	1.75	1.16	0.82	0.49	0.34	0.224	0.159

Tableau 3.1 - Facteur de magnification corticale en fonction de l'excentricité rétinienne d'un stimulus visuel. Figure tirée de Cowey et Rolls (1974).

Le cortex visuel est composé de différentes aires se distinguant par leur spécialisation fonctionnelle. Après l'analyse des stimuli visuels, l'information visuelle en V1 est transmise au cortex visuel secondaire (V2) qui projette ensuite vers les nombreuses aires visuelles extrastriées (V3, V4, V5 ou MT chez le singe, etc). Ces aires sont sensibles à différentes caractéristiques des stimuli visuels comme la couleur, le mouvement ou la forme des stimuli. Par exemple, l'aire V5 est spécifique du traitement des mouvements tandis que l'aire V4 est plus sensible aux formes et aux couleurs. Cette spécificité fonctionnelle entraîne une organisation bien distincte avec une augmentation de la taille des champs récepteurs en fonction de la propriété traitée. Pour fournir une image unifiée, toutes ces aires communiquent entre elles. Près d'une trentaine d'aires corticales différentes ont été découvertes pour le traitement de l'information visuelle.

Une première vision dichotomique du traitement de l'information visuel dans le système nerveux cérébral a émergé suite aux travaux d'Ungerleider et Mishkin sur le singe en 1982. Après avoir examiné les effets de lésions sélectives dans le cortex visuel de macaques sur une tâche de discrimination d'objet et une tâche de localisation spatiale, les auteurs ont proposé que le cortex visuel des primates soit organisé en deux grands systèmes : une voie dorsale et une voie ventrale qui se distinguent par la nature du traitement des informations visuelles. La voie dorsale permet de localiser un objet et la voie ventrale permet d'identifier et de reconnaître l'objet. Dix ans plus tard, Goodale et Milner proposent une dichotomie un peu différente en s'appuyant sur l'étude de patients cérébro-lésés. Au lieu de mettre l'accent sur les différences concernant la nature de l'information visuelle traitée, ils proposent deux systèmes de traitement de l'information visuelle qui se distinguent en fonction du type de traitement à réaliser (voir Figure 3.2). La voie dorsale projetant dans le cortex pariétal permettrait de localiser un objet en traitant les informations nécessaires à la saisie comme la position spatiale, l'orientation ou la taille de l'objet. Ces propriétés sont donc utiles pour l'action. La voie ventrale qui s'étend vers le cortex inféro-temporal serait impliquée dans la perception des objets, à savoir leur reconnaissance, en traitant leurs propriétés intrinsèques comme

leur forme ou leur couleur. Initialement, le fonctionnement de ces deux voies visuelles était considéré comme étant indépendant l'une de l'autre, puis interconnecté (voir Milner, 2017; Rossetti & Pisella, 2002 pour des revues).

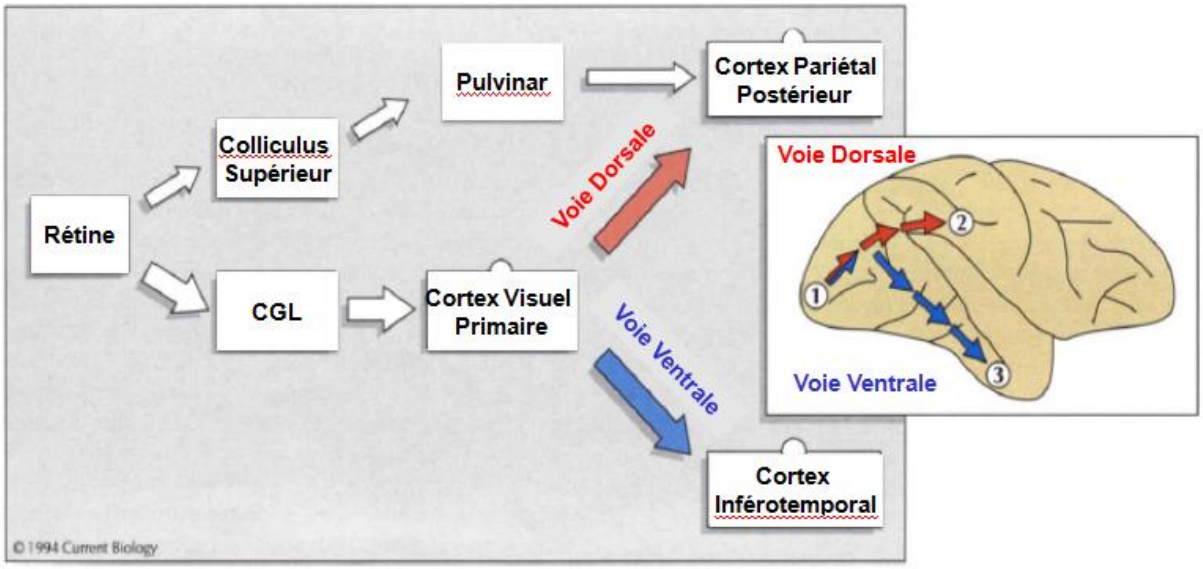

Figure 3.2 - Voies du traitement de l'information visuelle. L'information arrive à la rétine, qui est transmise au cortex visuel primaire via le corps genouillé latéral (CGL). Le cortex visuel primaire transmet ensuite l'information aux autres aires impliquées via la voie dorsale qui projette dans le cortex pariétal et la voie ventrale qui projette dans le cortex inférotemporal. Figure adaptée de Goodale et al. (1994).

3.2 La saccade oculaire

Afin d'explorer les éléments périphériques de notre champ visuel, des mouvements de l'œil, parfois accompagnés de mouvements de la tête, sont nécessaires. Il existe une diversité de mouvements des yeux réflexes ou volontaires se distinguant par leur rôle fonctionnel (Leigh & Zee, 2006) :

- *Les réflexes vestibulo-oculaires et opto-cinétiques* permettent le maintien des images stables sur la fovéa pendant les déplacements de la tête et de l'environnement respectivement.
- Les mouvements de *poursuite* sont sollicités afin de maintenir une image stable sur la fovéa tout en suivant une cible en mouvement.
- *Les saccades* ont pour but d'amener rapidement la fovéa sur l'objet d'intérêt.
- *Les micro-saccades et dérives oculaires* sont des mouvements involontaires de petites amplitudes mises en jeu pendant les temps de fixations visuelles.

Cette thèse se focalisera sur les saccades oculaires. Plus de 200 000 saccades par jour sont réalisées par l'Homme, en alternance avec des temps de fixations (pauses qui durent entre 100 et 500

millisecondes). Ces fixations sont tout autant essentielles puisqu'elles permettent le traitement de l'information visuelle, altéré pendant le mouvement saccadique (phénomène appelé la **suppression saccadique**, Bridgeman, Hendry, & Stark, 1975). Le système saccadique constitue un champ d'étude à part entière et est notamment utilisé dans l'étude des relations perception – action. En effet, au niveau comportemental, la richesse des réponses oculomotrices et des différents types de mouvements oculaires permet d'explorer et de comprendre la perception visuelle mais également d'obtenir des informations précieuses sur le fonctionnement cognitif. Une saccade, comme tout mouvement corporel, reflète le traitement des informations sensorielles et se définit par des paramètres temporels (latence et durée du mouvement), spatiaux (amplitude et direction du mouvement) et dynamique (vitesse, accélération et décélération du mouvement, voir Figure 3.3). La saccade est initiée en 200 ms en moyenne, c'est la **latence saccadique,** i.e. le temps de réaction saccadique (Becker, 1989; Fuchs, 1976). Elle dure quelques dizaines de millisecondes. La distance parcourue par l'œil correspond à **l'amplitude saccadique**, mesurée généralement en degrés d'angle visuel.

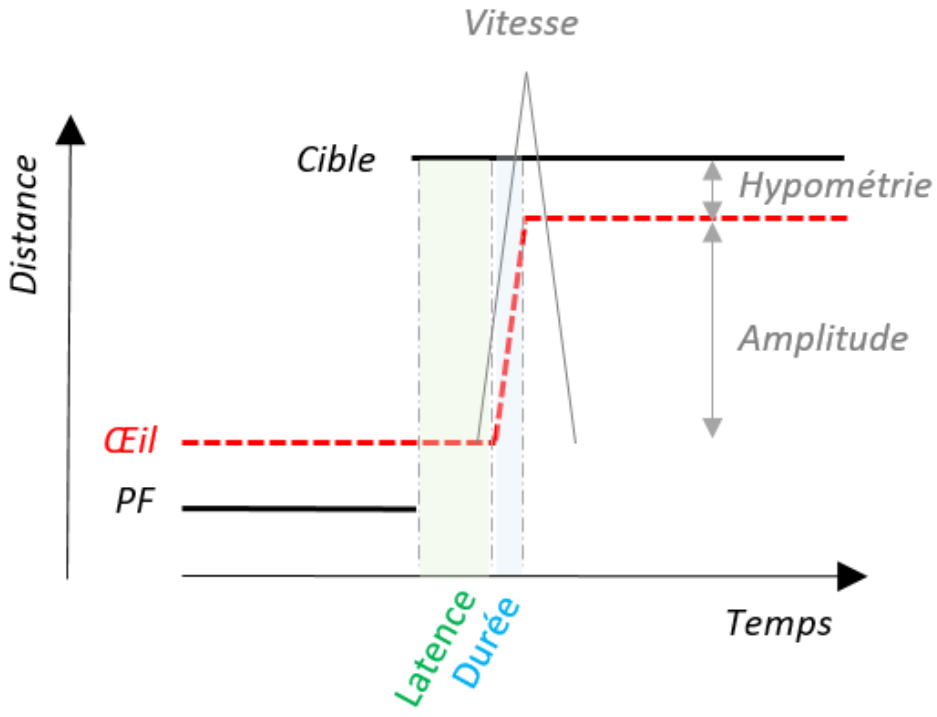

Figure 3.3 - Illustration des paramètres saccadiques. La ligne rouge pointillée représente la position de l'œil en fonction du temps et la distance et les deux lignes noires la position du point de fixation, PF et de la cible. La latence est définie par le temps entre le signal pour effectuer la saccade (ici, apparition de la cible simultanément à l'extinction du PF) et le départ de la saccade, en millisecondes. La durée de la saccade correspond au temps entre le départ et l'arrivée de la saccade, en millisecondes. L'amplitude correspond à la distance parcourue par l'œil, en degrés d'angle visuel. La vitesse, représentée par une ligne grise, en °/s est caractérisée par une accélération puis une décélération, en °/s^2. L'hypométrie est illustrée par une sous-visée de la cible.

Les paramètres spatiaux-temporels saccadiques seront analysés dans toutes les études de cette thèse. Les paramètres dynamiques (accélération, vitesse et décélération) quant à eux ne seront pas

examinés et ne seront donc pas développés dans cette introduction. Notons que ces paramètres saccadiques sont étroitement liés, notamment par la relation de **séquence principale** (*main sequence* en anglais, Bahill, Clark, & Stark, 1975) : une augmentation de l'amplitude saccadique entraîne une durée de la saccade plus grande et un pic de vitesse également plus élevé.

3.2.1 La transformation sensori-motrice pour la saccade

Lors de la réalisation d'un mouvement, la première étape consiste à intégrer une information sensorielle et ensuite à planifier l'action motrice vers un point dans l'espace. Pour exécuter une saccade, l'information visuelle doit être intégrée par les cellules rétiniennes qui la transmettront au système oculomoteur. Ce dernier a pour but de transformer cette information visuelle en commande motrice. Les coordonnées du mouvement sont transmises aux muscles extra-oculaires dans le but d'initier le mouvement. Cette TSM nécessite donc de transformer des coordonnées visuelles en vecteur moteur pour effectuer un mouvement saccadique précis vers l'objet d'intérêt. Le colliculus supérieur (CS) joue un rôle clé dans la TSM, notamment par son implication dans l'orientation vers les objets d'intérêt et donc dans la génération de la saccade (Wurtz & Albano, 1980). Les neurones des couches superficielles du CS reçoivent l'information provenant directement de la rétine et des aires visuelles (McPeek & Keller, 2002). Cette information est organisée en carte visuelle rétinotopique sur laquelle chaque neurone code pour un point donné sur la rétine. Comme dans V1, la fovéa prend une place importante en raison de la magnification corticale (Schira et al., 2007; Van Essen et al., 1984). Les neurones des couches intermédiaires et inférieures sont organisés en une carte motrice qui code les paramètres de la saccade en coordonnées polaires (Wurtz, 2009). Ces coordonnées motrices sont ensuite transmises aux neurones pré-moteurs de la formation réticulée et puis aux neurones moteurs qui permettront la contraction des muscles extra-oculaires. Cette TSM reflète une compétition entre des neurones excitateurs qui définissent les coordonnées de la saccade avec des neurones qui permettent le maintien du regard en fixation. Une fois que le mouvement est initié, aucune correction ne peut être apportée au programme moteur (Becker, 1989; Becker & Jürgens, 1979). Cela est principalement dû au fait que la saccade est un mouvement très rapide (environ 50 à 80 millisecondes, Robinson, 1964), qui n'obéit donc pas au même rétrocontrôle que la plupart des autres mouvements du corps humain. Parfois, la position de la cible sur la rétine encodée sous forme de vecteur visuel ne coïncide pas avec le vecteur moteur, c'est-à-dire que l'amplitude de la saccade ne correspond pas à l'excentricité réelle de la cible. Dans ces cas-là, un mécanisme d'adaptation de maintien de la vision peut être mis en place pour corriger la position d'arrivée de l'œil lorsque l'erreur est systématiquement répétée (voir section 4.3.3). Ce mécanisme se met naturellement en place à la suite d'une diminution des capacités musculaires lors du vieillissement ou suite à une pathologie. Un moyen d'induire une adaptation saccadique en laboratoire est de

simuler une erreur de visée en déplaçant la cible saccadique pendant la saccade. Le phénomène d'adaptation saccadique, qui permet de modifier expérimentalement l'amplitude de la saccade par la recalibration du système moteur, sera utilisé dans l'**Article 4** et l'**Etude 5** de cette thèse afin d'étudier les interactions entre les changements moteurs et la perception de taille et de durée d'un stimulus visuel.

3.2.2 Modèle fonctionnel de génération des saccades de Findlay et Walker (1999)

Inspirés par le modèle de Becker et Jürgens (1979), Findlay et Walker proposent en 1999 un modèle de génération des saccades fonctionnel, largement reconnu aujourd'hui par la communauté scientifique. Ce modèle a permis d'expliquer un grand nombre de travaux sur les mouvements saccadiques humains, en prenant en considération à la fois les aspects de bas et haut niveaux qui sont impliqués dans la génération de la saccade.

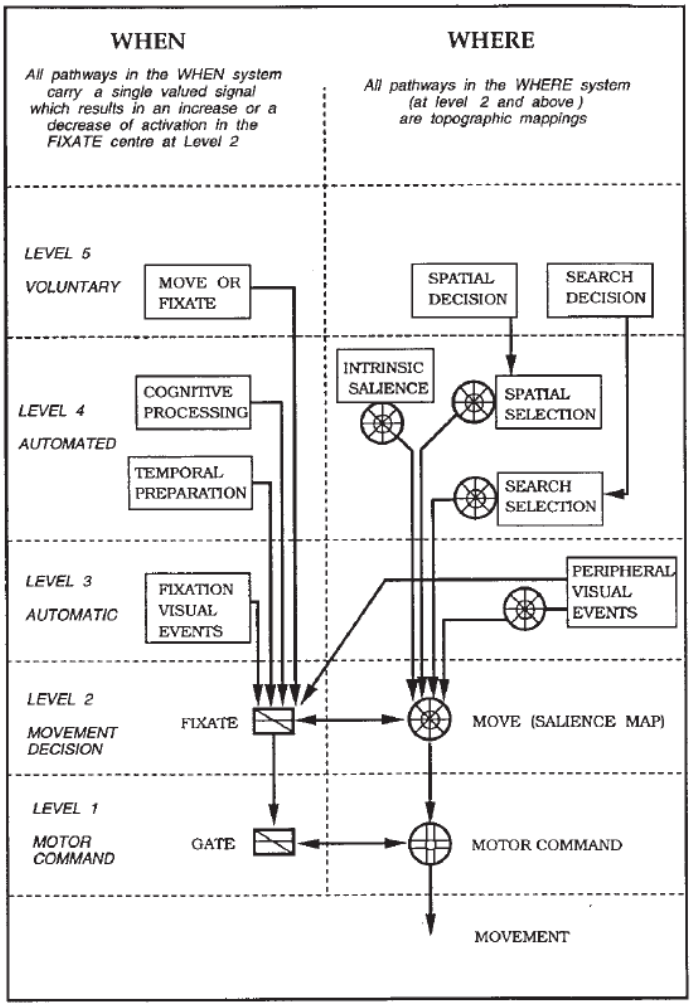

Figure 3.4 - Modèle fonctionnel de génération de saccades en 5 niveaux élaboré par Findlay et Walker en 1999. A gauche, la voie du « quand » détermine le moment auquel la saccade peut être déclenchée et à droite la voie du « où », responsable du calcul de la métrique de la saccade. Les double-flèches illustrent la compétition entre le système de fixation et celui du mouvement. Figure tirée de Findlay & Walker (1999).

Les chercheurs distinguent deux grands systèmes en constante compétition : (1) un système qui prend en charge le moment où la saccade sera déclenchée (le système « quand ») et (2) un système responsable du calcul de ses coordonnées (le système « où »). Dans ce modèle, illustré en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, les deux systèmes sont divisés en cinq niveaux de traitement de l'information. Le système « quand » (appelé centre de fixation, *fixate center* en anglais) reflète la latence de la saccade tandis que le système « où » (appelé centre de mouvement, *move center* en anglais) reflète la taille du mouvement et sa direction. Ces deux systèmes semblent fonctionner en parallèle et interconnectés. Le système « quand », qui décide quand partir, est celui qui va déclencher la saccade, et ce de façon indépendante de l'aboutissement du système « où ». Ces deux systèmes sont en compétition permanente de type « push-pull » : l'augmentation de l'activation d'un système entraîne le déclin de l'autre, jusqu'à ce que le système « quand » déclenche la saccade. Pour ce faire, l'activité du centre de fixation doit passer en dessous d'un certain seuil. Le temps de ce conflit déterminera le temps de réaction du mouvement saccadique (i.e. latence).

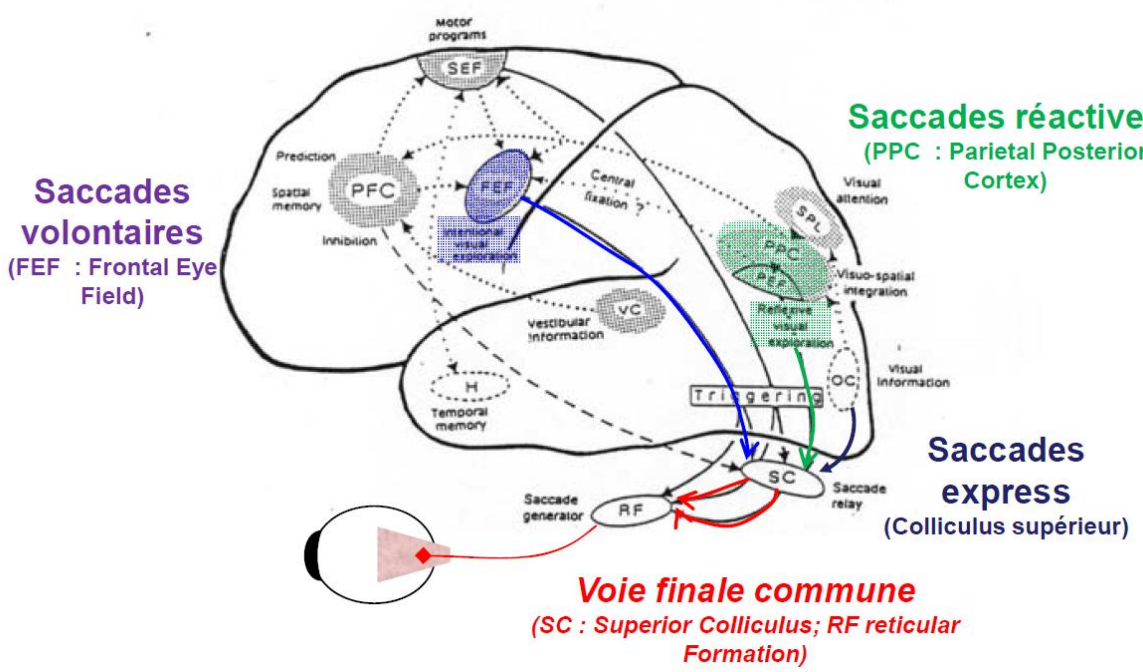

Figure 3.5 - Réseaux neuro-anatomiques des différents types de saccades. Selon l'implication des aires cérébrales, des différents types de saccades seront déclenchées. Les flèches indiquent la transmission de l'information visuelle. Le colliculus supérieur transmet les informations à la formation réticulée, qui est le générateur de saccade. La taille du parcours cérébral se reflète sur les temps de latence. R =, formation réticulée. SC = colliculus supérieur. OC = cortex occipital. PPC = cortex pariétal postérieur. SPL = lobe pariétal supérieur. VC = cortex vestibulaire. FEF = aire oculomotrice frontale. PFC = cortex préfrontal. SEF = aire oculomotrice supplémentaire. H = hippocampe. Figure adaptée de Pierrot-Deseilligny et al. (1995).

Le déclenchement d'une saccade peut s'opérer selon différents modes. On distingue généralement un déclenchement de la saccade exogène d'un déclenchement endogène. L'apparition brutale d'un stimulus entraînera un déclenchement exogène du fait de sa saillance perceptive. Ces

saccades dites saccades réactives sont caractérisées par un temps d'initiation très rapide, comparativement aux saccades volontaires qui sont déclenchées de façon endogène et donc plus lentement puisqu'elles sont contrôlées par l'observateur (en l'absence de modification dans le champ visuel). Les saccades volontaires dépendent de facteurs de haut niveau comme le but de l'observateur ou ses attentes. La génération de ces deux types de saccades implique des réseaux cérébraux bien particuliers (voir Pierrot-deseilligny, Milea, & Mu, 2004 pour revue). Toutes les saccades sont exécutées par la formation réticulée qui est en étroite connexion avec le colliculus supérieur. Bien que ce générateur de saccades soit commun à tous les types de saccades, on distingue une voie occipito-pariéto-colliculaire impliquée dans le contrôle des saccades réactives et une voie occipito-pariéto-fronto-colliculaire pour le contrôle des saccades volontaires (Figure 3.5). Les saccades express, qui sont des saccades très rapides, empruntent une voie courte, du colliculus supérieur à la formation réticulée (voir section 3.2.2.1). Pour étudier spécifiquement ces saccades, différents protocoles sont utilisés en manipulant les propriétés temporelles des stimuli visuels.

3.2.2.1 La latence : quand partir ?

La latence est définie par le temps d'initiation de la saccade. En condition expérimentale, elle correspond au temps entre le signal de départ et l'initiation du mouvement. Généralement, dans un protocole où le participant fixe un point central et doit effectuer un mouvement des yeux vers une cible suite à un signal de départ, une saccade met environ 200 millisecondes avant d'être initiée (Becker, 1989). Néanmoins, la latence saccadique subit des variations lorsque l'on manipule les propriétés temporelles des stimuli visuels qui la guident (i.e. le moment d'extinction du point de fixation et moment d'apparition de la cible). Nous venons de voir que les saccades réactives et volontaires impliquent des réseaux neuro-anatomiques différents. Ces saccades se différencient par leur mode de déclenchement. Il existe plusieurs protocoles, utilisés en laboratoire, qui permettent d'induire des saccades volontaires ou réactives. Les saccades réactives sont des saccades déclenchées par l'apparition brutale d'un stimulus dans le champ périphérique et sont étudiées en laboratoire via des conditions dites de *step* ou *gap* (voir Figure 3.6 pour une illustration des paradigmes).

Dans ces paradigmes, l'apparition du stimulus coïncide avec l'extinction du point central de fixation (*step*) ou bien est retardée par l'introduction d'un délai entre les deux (*gap*), généralement de 200 ms, qui provoque un a été introduit désengagement attentionnel précoce du point de fixation et un départ plus rapide. Cet effet a été retrouvé indépendamment de la connaissance préalable de la localisation de la cible (Saslow, 1967). Au niveau du modèle de génération des saccades, il est expliqué par la compétition entre le stimulus en zone fovéale, qui impacte le système de fixation et le

stimulus en zone périphérique qui stimule le système de mouvement. Lors de l'extinction du stimulus en zone fovéale, le centre de fixation (fixate center) est alors moins activé. Si cette extinction se produit avant l'apparition de la cible, la saccade sera initiée plus rapidement (Findlay & Walker, 1999). Parfois, ces saccades se déclenchent tellement rapidement (latences <150 ms) qu'elles sont dites saccades express (Fischer & Ramsperger, 1984).

Dans un paradigme dit *overlap,* le point de fixation et la cible sont simultanément présentés. Par exemple, dans le cas d'un *overlap 600,* le point de fixation disparaît au bout de 600 millisecondes. La disparition de la croix de fixation est le signal que le participant doit effectuer sa saccade vers la cible. Dans ce cas, la consigne de fixation est en compétition avec l'exécution de la saccade et retarde son initiation. Ce protocole induit des saccades volontaires, tout comme demander aux sujets d'effectuer une saccade dans la direction opposée à celle de la cible (*paradigme d'anti-saccade,* Hallet, 1978) ou vers une cible présentée antérieurement et donc absente du champ visuel *(paradigme de saccades mémorisées).* Ces deux derniers cas entraînent également des saccades avec des latences plus longues (jusqu'à 450 ms) (Leigh & Zee, 2006). Tous ces paradigmes, utilisent les mêmes stimuli visuels mais en manipulant leur relation temporelle, ils sont donc facilement comparables et permettent d'induire des saccades de différents types. Nous verrons dans cette thèse que le choix du paradigme est une question importante quand on souhaite observer des effets de la cognition numérique sur les paramètres saccadiques.

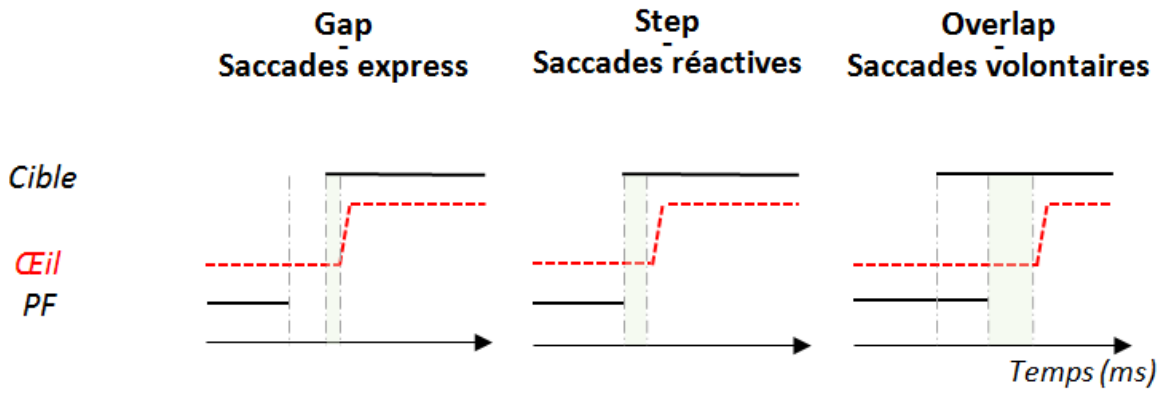

Figure 3.6 - Les différents paradigmes expérimentaux modulant la latence saccadique en manipulant les délais entre l'extinction du point de fixation (PF) et l'apparition de la cible. La latence, en vert, correspond au temps entre l'extinction du point de fixation et l'initiation de la saccade.

La latence de la saccade peut également être modifiée par la présence d'un stimulus dans l'environnement appelé **distracteur** (Lévy-Schoen, 1969; Ross & Ross, 1980; Ross & Ross, 1981). Si ce dernier est présenté à une distance assez lointaine de la cible, le temps pour initier la saccade sera retardé en comparaison à une condition où la cible saccadique est seule (i.e. sans distracteur). Cet **effet du distracteur éloigné** (*remote effect* en anglais) n'affecte pas la précision de la saccade. En

contrepartie, si le distracteur est proche de la cible, la latence ne sera pas impactée mais la précision de la saccade sera largement diminuée. En effet, au lieu d'arriver sur la cible visuelle, le regard se pose à une position intermédiaire entre la cible saccadique et le distracteur visuel. L'effet d'un distracteur proche, appelé **effet global** (*global effect* en anglais), sera développé dans la section suivante.

3.2.2.2 L'amplitude : où aller ?

L'amplitude saccadique correspond à la distance parcourue par l'œil pour aller d'un point à un autre dans le champ visuel. Lorsque la cible est isolée (présentée seule), les saccades sont relativement précises. Cependant, comme illustré dans la Figure 3.3, on observe généralement une sous-visée de la cible de 5 à 10%, appelée **hypométrie** (Becker, 1989). Ces saccades hypométriques sont parfois suivies de saccades correctives, permettant de corriger l'erreur de visée (Becker, 1989). Dans certains cas, on peut observer une hypermétrie, l'œil arrive au-delà de la cible. Les saccades hypermétriques sont très rares chez les participants n'ayant pas de pathologie oculaire ou neurologique. La précision de la saccade est mesurée par le gain, en divisant l'amplitude de saccade par l'excentricité de la cible (un gain <1 indique une sous-visée ; un gain>1 indique une sur-visée et un gain égal à 1 une précision parfaite).

La précision des saccades semble varier avec l'excentricité de la cible, bien que les résultats des différentes études soient controversés (Gillen, Weiler, & Heath, 2013; Kapoula, 1985; Nuthmann, Vitu, Engbert, & Kliegl, 2016). Kapoula (1985) a montré que les observateurs tendent à sur-viser les cibles proches et à sous-viser les cibles éloignées, dans un intervalle de taille des cibles relative (e.g. petite taille par rapport aux autres cibles). Cet effet, appelé effet de gamme (Saccadic Range Effect), n'a pas été répliqué par d'autres chercheurs (Findlay, 1982; Nuthmann et al., 2016) qui optent plutôt pour l'idée d'une augmentation de l'hypométrie avec l'amplitude (Gillen et al., 2013), surtout pour des saccades d'amplitude supérieure à 10-15° (Frost & Pöppel, 1976). Notons que les études présentées ci-avant ont été réalisées à partir de saccades horizontales, avec le plus souvent la consigne d'effectuer la saccade vers une cible le plus vite et le plus précisément possible.

Pour conclure, quand une cible seule et petite est présentée, le système saccadique vise correctement, avec une légère hypométrie. En situation écologique, il est très rare qu'une cible soit présentée seule. Effectuer une saccade implique donc de sélectionner une cible parmi plusieurs cibles possibles dans le champ visuel. Plusieurs études se sont intéressées à la précision d'une saccade et à ce processus de sélection quand plus d'une cible est présentée. Le point d'arrivée de la saccade dans ces conditions expérimentales permet de mieux comprendre ce processus de sélection. Quand deux cibles sont présentées, les yeux des sujets visent systématiquement un point intermédiaire à la seule condition que le distracteur soit présenté dans une fenêtre d'environ 20 à 30

degrés d'angle visuel autour de la cible (Walker, Deubel, Schneider, & Findlay, 1997). Ce phénomène a initialement été observé par Coren et Hoenig en 1972 pour des saccades volontaires. Les participants devaient effectuer une saccade vers un stimulus à 10° d'excentricité soit à gauche soit à droite d'une fixation centrale. Lorsqu'un distracteur, visuellement différent, était présenté horizontalement à différentes excentricités, l'amplitude saccadique était impactée, et ce d'autant plus lorsque le distracteur était présenté entre le point de fixation et la cible. En 1982, Findlay répliqua ces résultats et nomma ce phénomène **effet global** (voir Van der Stigchel & Nijboer, 2011 pour une revue). Dès lors que plus d'un stimulus est présenté, le système saccadique semble viser le centre de gravité de la configuration visuelle formée par les éléments visuels. L'existence d'une carte de saillance au sein du colliculus supérieur a été proposée par Itti et Koch (2000) suggérant que chaque point de l'espace visuel est représenté par un neurone sur cette carte. Les coordonnées du vecteur saccadique résulteraient d'un pic d'activité d'un seul neurone, codant pour une position dans l'espace. Quand une seule et petite cible est présente, un seul neurone est activé. Dans le cas où plusieurs cibles sont présentées, et sont spatialement proches, plusieurs neurones sont activés. Le point final du vecteur résulte du moyennage de l'activité des neurones voisins, correspondant au centre de gravité de la configuration.

Comme nous l'avons vu, la position du distracteur constitue un élément important pour observer ce moyennage. En effet, le distracteur doit être présenté dans une région relativement proche spatialement, d'environ 30 à 35 degrés comme nous avons vu. Au-delà de cette fenêtre (Figure 3.7.a), la précision de la saccade n'est plus impactée mais le distracteur retarde la latence de 20 à 40 millisecondes (Lévy-Schoen, 1969). Cet effet du distracteur éloigné augmente avec la proximité du distracteur en zone fovéale (Walker et al., 1997). Certains auteurs proposent qu'un distracteur présenté dans une fenêtre restreinte autour de la cible interfère avec le processus de sélection de la cible entraînant une modification de l'amplitude, tandis qu'il perturbe le processus de désengagement de la fixation quand il est présenté en dehors de cette fenêtre, augmentant la latence saccadique (McSorley & Findlay, 2003; Walker et al., 1997).

Notons que la latence de la saccade joue un rôle important dans l'observation de l'effet global (Ottes, Gisbergen, & Eggermont, 1984). L'augmentation de la latence de la saccade réduit la taille de l'effet global (Coëffé & O'regan, 1987; Findlay, 1982). Le nombre d'éléments de la configuration spatiale a également montré une atténuation de l'effet. Plus le nombre d'éléments augmentait, plus l'effet global était réduit (McSorley & Findlay, 2003). Il faut préciser que l'augmentation du nombre d'éléments entraînaient également une augmentation de la latence de la saccade, il semble donc difficile de déterminer si la réduction de l'effet global est une conséquence directe du nombre d'éléments de la configuration. En accord avec le modèle de génération des saccades de Findlay et Walker (1999), l'augmentation de la latence donne un temps supplémentaire au système « où » qui

sélectionne alors plus précisément la position de la cible. L'hypothèse d'un premier traitement global qui sélectionne le centre de gravité et, si le temps le permet, d'un second traitement pour sélectionner la position précise de la cible, a été proposée (Van der Stigchel & Nijboer, 2011).

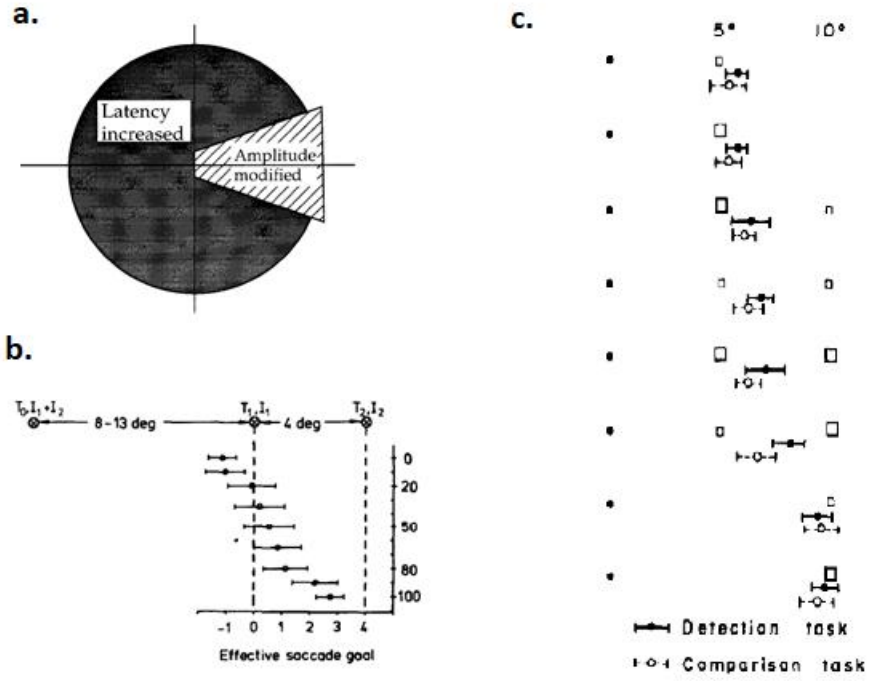

Figure 3.7 - Effets d'un distracteur et de ses caractéristiques sur les paramètres saccadiques. (a) Représentation de l'effet d'un distracteur en fonction de sa position par rapport à la cible. Présenté dans une fenêtre de 30-35° d'angle autour de la cible, un distracteur modifie l'amplitude de la saccade, tandis qu'au-delà de cette fenêtre, il augmente la latence de la saccade. Figure tirée de Walker et al. (1997). *(b) Positions d'arrivée de la saccade en fonction de la luminance relative des stimuli. La somme de l'intensité lumineuse I_1+I_2 est toujours égale à 60 cd/m^2. On observe une attraction des yeux vers le stimulus le plus lumineux. Figure tirée de* Deubel et al. (1984). *(c) Positions d'arrivée de la saccade en fonction de la taille relative des carrés en fonction de la tâche du sujet. La tâche de détection consistait à détecter une stimulation à l'intérieur d'un carré présent dans 50% des cas. La tâche de comparaison consistait à juger si la configuration de l'essai était similaire ou non à celle de l'essai prédécent. On observe une attraction des yeux vers le stimulus le plus gros. Figure tirée de* Findlay (1982).

L'effet global est également modulé par les propriétés visuelles des stimuli. Le moyennage est influencé par la saillance des stimuli comme leur taille ou leur luminance. Si un des deux stimuli est plus saillant, le pic d'activité dans la carte de saillance sera plus proche de ce stimulus, indépendamment du fait qu'il soit le distracteur ou la cible. Findlay (1982) a testé dans sa seconde étude comment la taille des stimuli module l'effet global. Lorsque deux carrés de même taille sont présentés à 5 et 10° d'un point de fixation (du même côté), la position d'arrivée de la première saccade atteint le milieu des deux carrés, avec une tendance à être plus déviée vers le carré le plus proche du point de fixation (expliqué par la magnification corticale, voir section 3.1). Si un des deux

carrés est plus gros en taille, alors le point d'arrivée de la saccade sera dévié vers ce carré (Figure 3.7.c). L'intensité relative des stimuli engendre le même effet que celui de la taille (Deubel et al., 1984). Deux cibles éloignées de 4° ont été présentées avec des intensités lumineuses variables, la somme des deux étant toujours égale à 60 cd/m^2. De façon similaire à la taille, la position d'arrivée de la saccade est déviée vers le stimulus le plus lumineux (Figure 3.7.b). Le mécanisme par défaut pour sélectionner une cible est donc le centre de gravité de la configuration spatiale des éléments, pondéré en fonction des propriétés des stimuli. Ces résultats ont été généralisés à l'activité de lecture (Vitu, 1991, 2008). Dans le cas de lecture de mots isolés, les yeux arrivent au centre de gravité du mot. Néanmoins, si l'intensité des lettres est manipulée, la saccade sera déviée vers les lettres les plus lumineuses, corroborant l'idée d'une pondération liée aux caractéristiques des éléments de la configuration (Beauvillain, Doré, & Baudouin, 1996). Dans le chapitre suivant, l'effet global sera abordé en tant qu'outil dans l'étude de la saillance numérique pouvant impacter l'amplitude saccadique (**Article 3** de la thèse).

4 La métrique de la saccade oculaire dans l'étude des relations perception/action

SOMMAIRE

4.1 Arguments neurophysiologiques ***68***

4.2 Interactions entre les magnitudes continues et le système oculomoteur ***69***

4.3 L'amplitude, un paramètre moteur a étudier ***72***

4.3.1 Ajouter un distracteur : l'effet global 72

4.3.2 Supprimer la cible saccadique 75

4.3.3 Déplacer la cible pendant la saccade : l'adaptation saccadique 76

En 2016, une revue de littérature révèle une augmentation des recherches utilisant l'oculométrie dans l'étude du traitement numérique et arithmétique (Mock et al., 2016). L'intérêt de ce quatrième chapitre est de faire le point sur les connaissances des interactions entre le système visuel saccadique et le traitement des informations numériques, spatiales et temporelles. Pour rappel, le modèle ATOM propose que le traitement des dimensions numérique, spatiale et temporelles serait sous-tendu (au moins partiellement) par un système de magnitude commun dans le but d'agir sur l'environnement. La question est de savoir comment la métrique des saccades interagit avec la magnitude de ces dimensions perceptives. Rappelons que le système oculomoteur offre de larges possibilités d'études, entre les différents mouvements possibles de l'œil et les périodes de fixations. Ces dernières sont le reflet des temps de traitement cognitif et des stratégies utilisées pour effectuer une tâche cognitive. Le comportement oculaire permet aussi d'obtenir des informations attentionnelles pendant les périodes de fixation. Par exemple, sur l'orientation de l'attention, présenter un chiffre central sous sa forme symbolique en amorce facilite la détection d'une cible en périphérie selon la congruence entre le côté de l'espace activé par le chiffre et le côté de présentation de la cible (Fischer, Castel, Dodd, & Pratt, 2003). La magnitude du chiffre active donc automatiquement un côté de l'espace et oriente l'attention pendant la période de fixation, et ce même chez des enfants de 8 à 9 mois (Bulf et al., 2016).

Les temps de fixations sont parfois entrecoupés de petits mouvements involontaires appelés micro-saccades. L'étude de ces mouvements de très petite amplitude (inférieure à 1°) pendant une tâche de fixation a permis de montrer que le simple fait d'entendre un nombre dévie la fixation vers la gauche ou la droite selon la magnitude numérique (Myachykov, Cangelosi, Ellis, & Fischer, 2015; Myachykov et al., 2016). Des effets équivalents ont été observés lorsque les participants doivent

effectuer des tâches arithmétiques simples : les soustractions dévient le regard vers la gauche tandis que les additions le dévient vers la droite (Klein, Huber, Nuerk, & Moeller, 2014).

La diversité des saccades, et leurs différences comportementales et anatomiques, permettent une exploration intéressante des processus cognitifs. Une fois initiée, le mouvement saccadique ne peut être corrigé en cours d'exécution, ce qui est lié à la rapidité du mouvement oculaire. Alors comment un mouvement si rapide peut-il refléter des traitements numériques, spatiaux ou temporels ? Les données en imagerie-cérébrale restent rares mais nous avons vu que le lobe pariétal joue un rôle important puisqu'il est au carrefour des aires visuelles et des aires motrices.

4.1 Arguments neurophysiologiques

Les interactions entre les magnitudes continues et les mouvements des yeux suggèrent l'existence d'un chevauchement cérébral, ce qui s'observe sur les données comportementales et en neuro-imageire. Bien que les connaissances à ce sujet restent limitées, nous savons que la voie dorsale serait impliquée à la fois dans la programmation des mouvements saccadiques et des tâches perceptives. Irwin et Thomas en 2007 ont rapporté une interférence entre le traitement numérique et l'amplitude saccadique. Les participants devaient réaliser soit une tâche de comparaison de magnitudes (< ou > 65) soit une tâche de jugement de parité (pair *vs.* impair), pendant qu'ils fixaient un stimulus ou effectuaient des saccades de différentes amplitudes (7 ou 40°) à gauche ou à droite. Les temps de réaction pour effectuer la tâche de comparaison de magnitudes étaient modulés par la taille de la saccade tandis qu'aucun effet n'était observé pour la tâche de jugement de parité. Plus précisément, les temps de réaction augmentaient avec l'amplitude de la saccade, mais uniquement pour des saccades dirigées vers la gauche (Figure 4.1).

Ces résultats mettent pour la première fois en lumière une influence de l'amplitude saccadique sur le traitement numérique. Les auteurs proposent, pour expliquer cette interaction, que le cortex pariétal droit est activé non seulement dans la génération de saccades vers la gauche mais également dans les tâches de comparaison de magnitudes. Effectivement, cette tâche impliquerait la voie dorsale (Dehaene, 1996; Fias et al., 2003; Pinel, Dehaene, Riviere, & Le Bihan, 2001) alors que la tâche de jugement de parité impliquerait plutôt la voie ventrale (Irwin & Thomas, 2007). Les tâches de jugement d'orientation d'un objet impliquent également la voie dorsale, étayant l'idée que cette voie est impliquée dans le codage spatial des objets et des symboles. Par exemple, une étude en IRMf a montré une activation bilatérale supérieure et postérieure du lobe pariétal lors de la réalisation de tâches d'arithmétiques (Knops, Thirion, Hubbard, Michel, & Dehaene, 2009). De façon intéressante, ces auteurs ont trouvé des activations similaires pendant que les participants réalisaient (1) une tâche de soustraction et effectuaient des saccades vers la gauche et (2) une tâche

d'addition et effectuaient des saccades vers la droite. Simon et ses collègues en 2002 avaient soutenu que la région intra-pariétale était commune pour le calcul, les saccades et le langage (voir chapitre 1), région également connue pour être impliquée dans la transformation sensori-motrice (Culham & Valyear, 2006; Gallivan & Culham, 2015) et le traitement des magnitudes spatiales, numériques et temporelles (voir section 2.2). Ces études suggèrent donc l'existence d'un code neural commun pour les traitements des magnitudes perceptives et la programmation saccadique.

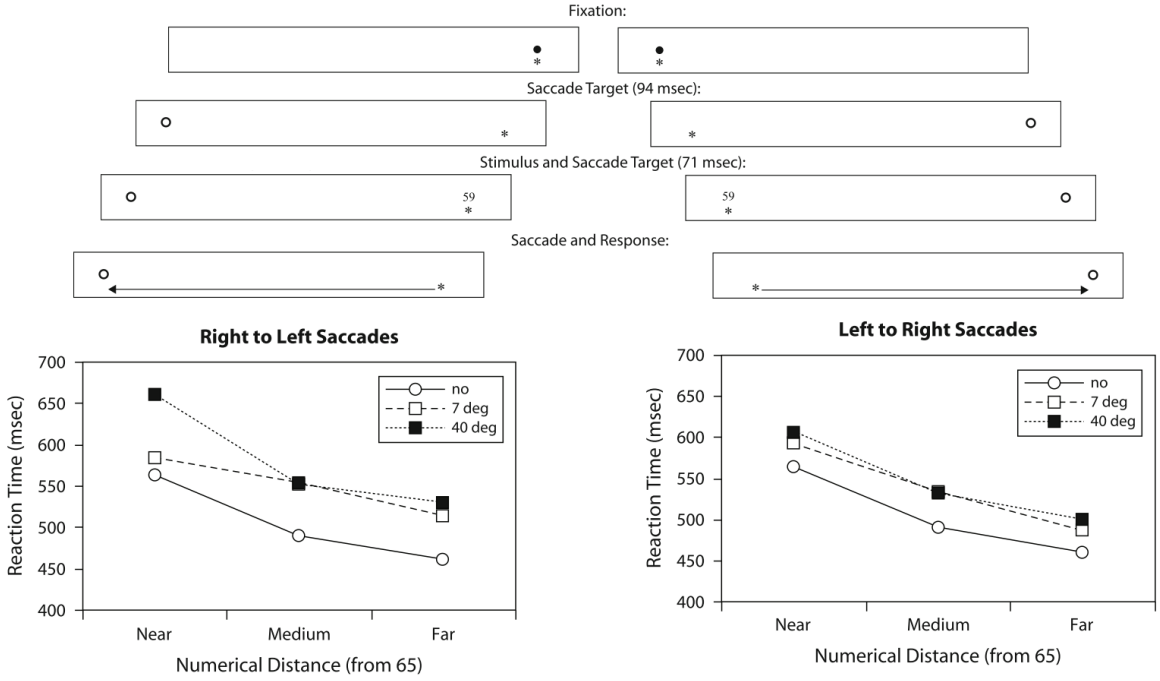

Figure 4.1 – En haut, déroulement d'un essai expérimental. En bas, temps de réaction en millisecondes à la tâche de comparaison de magnitudes en fonction du côté de réponse (à droite – saccades vers la droite, à gauche – saccades vers la gauche), de la condition saccadique (pas de saccade, saccade de 7 degrés, saccade de 40 degrés), et de la distance numérique par rapport au standard 65 (near = proche, medium = intermédiaire, far = éloigné). Figure tirée de Irwin et Thomas (2007).

4.2 Interactions entre les magnitudes continues et le système oculomoteur

Une des premières études à avoir mis en évidence un effet SNARC sur des saccades (ici, saccades guidées par la mémoire) est celle de Fischer, Warlop, Hill, et Fias (2004). Dans une tâche de jugement de parité, les saccades vers la gauche sont initiées plus rapidement en réponse à des petits chiffres et les saccades vers la droite sont initiées plus rapidement en réponse à des grands chiffres. Cet effet semble donc s'observer de la même façon que sur les temps de réaction manuels. Pourtant, nous allons voir que les réponses d'appui-bouton se distinguent des réponses saccadiques. En effet, dans les protocoles classiques utilisant les réponses manuelles, les deux mains sont positionnées dans l'espace (main gauche / espace gauche et main droite / espace droit). Les participants ont pour tâche

d'appuyer le plus rapidement possible avec leur main gauche / droite sur le bouton gauche / droit selon les caractéristiques liées au chiffre (grandeur, parité, etc). Le temps de réponse correspond donc au temps entre l'apparition du chiffre et l'appui-bouton, mais ce type de mouvement ne permet pas l'analyse des paramètres moteurs telle que l'amplitude. Avec des réponses saccadiques, le participant doit fixer un stimulus au centre de l'écran et ensuite effectuer un **mouvement dirigé** vers un côté de l'espace. Le temps de réaction dans ce cas correspond au délai entre l'apparition du chiffre et le départ de la saccade. Les réponses manuelles et les réponses saccadiques fournissent donc des informations différentes puisque pour l'effecteur de la main, le système moteur programme uniquement un appui-bouton tandis que pour les yeux, il doit programmer un mouvement vers une cible.

Dans une récente étude, l'effet SNARC a été comparé selon trois effecteurs : les mains, le bras et les yeux (Hesse et al., 2016). Le mouvement de pointage est effectué au départ d'un point central vers une position périphérique, comme pour le cas des saccades. Les chercheurs ont observé une corrélation entre la force de l'effet SNARC pour les conditions dans lesquelles le mouvement est réalisé avec la main, qu'il s'agisse d'un appui-bouton et pointage, mais aucune corrélation avec la condition saccade. Les auteurs ont donc proposé que les cartes sensori-motrices impliquant la main ne partagent pas de représentations avec les cartes sensori-motrices des yeux. Le système saccadique semble donc avoir ses propres codes pour observer des effets spatio-numériques. D'autre part, l'effet SNARC vertical a été également rapporté avec des réponses saccadiques, c'est-à-dire des latences plus courtes pour initier une saccade vers le bas en réponse à des petits chiffres et vers le haut en réponse à des grands chiffres (Schwarz & Keus, 2004). La question d'un effet SNARC utilisant les différentes formes symboliques des nombres a fait l'objet de l'**Article 1** de cette thèse, puisque l'effet SNARC n'avait jamais été testé avec la présentation de chiffres écrits en toutes lettres sur des réponses saccadiques. Bien que le traitement des mots de chiffres[3] soit similaire à celui du chiffre arabe, tous deux étant des représentations symboliques du nombre, il faut noter des différences au niveau de leurs temps de traitement de l'information (voir section 1.1.1.3). Nous avons montré qu'avec des réponses saccadiques, contrairement aux réponses manuelles, les associations spatio-numériques ne s'observent pas avec des mots de chiffres. Pourtant, d'autres expériences ont montré que l'effet s'observe en réponse à certaines magnitudes non-symboliques appuyant l'idée que des magnitudes continues (e.g. taille physique), ou discrètes (e.g. ensemble de points), sont spatialement orientées de gauche à droite comme les chiffres arabes (Bulf, Macchi Cassia, & de Hevia, 2014). Les notions de passé et futur n'échappent pas non plus à cette organisation spatiale puisqu'une étude a montré un biais oculomoteur plus fort vers la gauche lorsque des participants encodent et rappellent

[3]« Mots de chiffres » est utilisé pour décrire les chiffres écrits en toutes lettres

des mots relatifs au passé en comparaison à des mots relatifs au futur (Martarelli, Mast, & Hartmann, 2017).

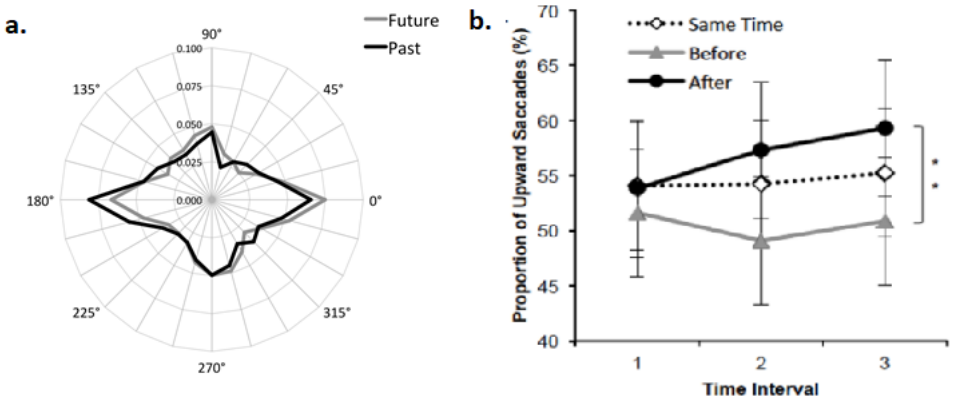

Figure 4.2 - Illustration des associations entre temps et espace. (a) Distribution des changements de positions des yeux sur les axes horizontal et vertical en fonction des mots relatifs au futur (« future ») ou au passé (« past »). Figure tirée de (Martarelli et al., 2017). *(b) Proportion des saccades dirigées vers le haut selon le traitement de phrases liées au passé (« before »), au présent (« same time ») et au futur (« after ») et en fonction de l'intervalle de temps après l'apparition du mot exprimant la relation temporelle dans la phrase (500–1500 ms pour l'intervalle 1, 1500–2500 ms pour l'intervalle 2 et 2500–3500 ms pour l'intervalle 3). Figure tirée de* Corinna et Fred (2016).

Concernant les associations entre les concepts temporels et l'axe vertical de l'espace (bas *vs*. haut), les résultats sont contradictoires. Si les résultats de l'étude de Martarelli et al. (2017) n'ont pas montré de biais oculomoteur vertical en fonction des concepts de passé / futur, une autre étude, illustrée en Figure 4.2, a montré que l'axe vertical était aussi révélateur de ces associations (Corinna & Fred, 2016). Dans cette dernière, lors de traitement de phrases relatives aux concepts passé/présent/futur, les chercheurs ont rapporté un nombre plus grand de saccades dirigées vers le haut pour le traitement de phrases concernant le futur plutôt que le passé.

De façon étonnante, la position des yeux peut également donner des indications sur le nombre qu'un participant a en tête (Loetscher & Nicholls, 2010) ou même sur la valeur des cartes que possède un joueur de blackjack (Holmes, Ayzenberg, & Lourenco, 2016). Dans l'étude de Loetscher et Nicholls (2010), comme évoqué dans la section 2.3.1, les participants devaient générer des nombres compris entre 1 et 30 de façon aléatoire. Les positions des yeux étaient enregistrées 500 millisecondes avant la génération du chiffre. Pour chaque chiffre généré, une position du regard était donc associée. Par rapport à la position du regard mesurée lors de la génération du nombre précédent, un changement de position du regard vers le bas et à gauche prédisait un nombre généré (n) inférieur à celui précédemment généré (n-1). Un changement vers le haut et à droite prédisait un nombre généré (n) supérieur à celui précédemment généré (n-1). De plus, la taille du changement de position des yeux reflétait la distance numérique entre le nombre précédent et celui sur le point d'être généré. Ainsi, plus grande était la distance entre les positions des yeux associées à n-1 et n,

plus grande était la distance entre les chiffres n-1 et n. Ces études suggèrent donc un lien fort entre saccade et perception des magnitudes numérique, temporelle et spatiale.

Comme expliqué plus haut, les réponses saccadiques offrent une large gamme de mesures du comportement en comparaison aux réponses bimanuelles (appui-bouton) puisqu'elles permettent l'exploration des paramètres temporels (i.e. latence) mais aussi spatiaux (i.e. amplitude). Pourtant, très peu d'études ont directement observé les relations entre les magnitudes continues (symboliques ou non-symboliques) et les paramètres moteurs de la saccade.

4.3 L'amplitude, un paramètre moteur à étudier

Dans un paradigme classique dans lequel le participant doit effectuer une saccade d'un point de fixation vers une cible, l'amplitude de la saccade correspond généralement à l'excentricité de la cible, bien que souvent on observe une hypométrie (voir Figure 4.3). Les propriétés du système oculomoteur vont nous permettre d'exploiter ce paramètre d'amplitude puisqu'il est flexible et plastique. Si l'étude de Fischer et ses collègues (2004) n'a pas montré d'effet du traitement des nombres sur l'amplitude saccadique lors de la visée d'une cible isolée, cela ne signifie pas que l'effet n'existe pas. Les conditions expérimentales ne permettent peut-être tout simplement pas d'observer l'effet du traitement numérique. Dans un premier temps, nous présenterons comment l'effet global, un paradigme connu pour modifier l'amplitude de la saccade, peut refléter le traitement numérique. De plus, ce protocole nous permettra de tester si la magnitude numérique est une propriété saillante pour le système visuel susceptible de moduler l'effet global. Dans un second temps, nous testerons l'hypothèse selon laquelle la variabilité des amplitudes saccadiques est nécessaire pour observer l'expression du traitement numérique. Pour cela, nous proposerons de supprimer la cible saccadique afin d'induire des saccades dont l'amplitude n'est pas contrainte par une position spatiale pré-définie. Dans un troisième temps, nous présenterons le protocole d'adaptation saccadique qui reflète la plasticité du système visuel. Ce protocole est connu pour modifier l'amplitude de la saccade par la recalibration de l'amplitude saccadique et nous permettra d'étudier les conséquences perceptives d'un changement moteur. Ainsi, nous testerons si la modification de la métrique de l'action entraîne des changements perceptifs comme de taille ou de durée d'un objet.

4.3.1 Ajouter un distracteur : l'effet global

La présence d'un distracteur spatialement proche de la cible est bien connue pour moduler l'amplitude de la saccade, puisque le point d'arrivée des yeux correspond, en général, à la position intermédiaire entre la cible et le distracteur (Coren & Hoenig, 1972; Findlay, 1982). Cet effet global a été expliqué par l'existence d'une carte de saillance au sein du colliculus supérieur dans laquelle chaque neurone code pour une position dans l'espace. Le pic d'activité d'un neurone indique les

coordonnées du vecteur saccadique (voir section 3.2.2.2). Les propriétés physiques des stimuli formant une configuration visuelle ont modulé l'effet global, le pic d'activité est plus proche du stimulus le plus **saillant**, déviant le centre de gravité de la configuration et donc le point d'arrivée de la saccade vers lui. Comme illustré dans la Figure 4.3, plus la taille du stimulus ou sa luminance augmente, plus la position d'arrivée de la saccade sera déviée vers le distracteur (Deubel et al., 1984; Findlay, 1982). L'effet global offre donc la possibilité de mesurer la saillance visuelle des stimuli.

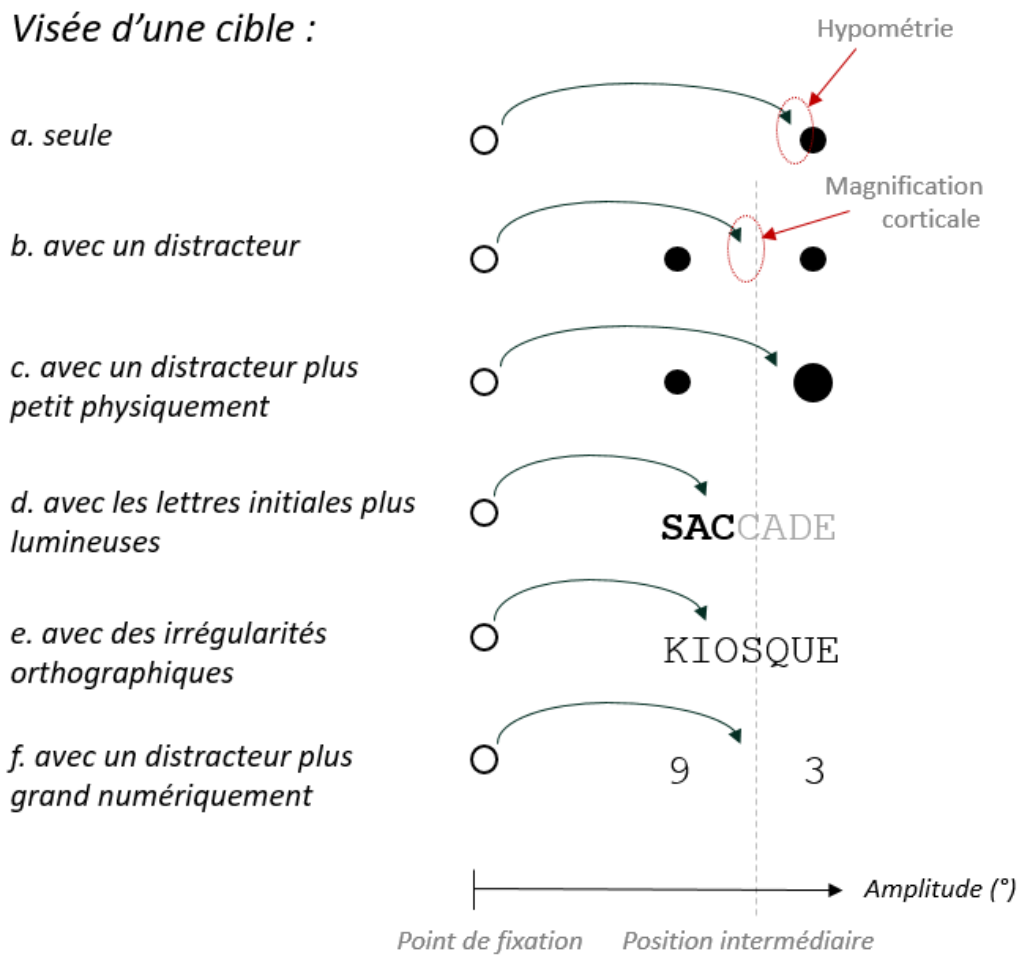

Figure 4.3 – Illustration de la visée d'une cible dans différentes conditions expérimentales. L'hypométrie est caractérisée par une sous-visée. La magnification corticale est caractérisée par une déviation vers le stimulus le plus proche du point de fixation. (b) et (c) résultats tirés de Findlay (1982). *(d) et (e)* résultats tirés de Beauvillain et al. (1996). *(f) hypothèse de l'Article 2 de cette thèse*

Si la saillance perceptive dépend des propriétés physiques des stimuli, quelques études suggèrent qu'elle peut dépendre aussi de propriétés plus abstraites. Dans le cadre des recherches sur la programmation des saccades lors de la lecture (Vitu, 1991, 2008), une étude s'est intéressée tout d'abord à l'effet de la luminance des lettres d'un mot (Beauvillain et al., 1996). Lorsque le participant devait viser un mot avec des lettres uniformément lumineuses, la position d'arrivée de la saccade était décalée légèrement à gauche du centre de gravité de la configuration formée par les lettres, en

cohérence avec l'effet global et la magnification corticale (Figure 4.3). De façon intéressante, lorsque 80% de la luminance totale de la configuration était concentrée sur la partie initiale ou la partie finale du mot, le point d'arrivée de la saccade était dévié vers la partie la plus lumineuse. Ces résultats étendent ceux de Findlay (1982) à l'activité de lecture. Dans une seconde expérience, les auteurs ont rajouté un facteur d'ordre linguistique. Ils distinguaient les mots qui commençaient par des lettres informatives non partagée par d'autres mots (e.g. « cyg » dans « cygne ») des mots qui se terminaient par des lettres informatives (e.g. « nif » dans « canif »). L'effet de la luminance était éliminé uniquement pour les mots ayant des lettres informatives au début du mot. Les expériences conduites à la suite de cette étude ont montré que cet effet est essentiellement dû à l'irrégularités orthographique formée par ces séquences de lettres en début de mot puisque même lorsque la luminance des lettres est maintenue constante, le regard est attiré par des irrégularités orthographiques présentes au début du mot (expérience 4, Beauvillain et al., 1996). Ces résultats suggèrent que l'effet global n'est pas seulement modulé par des facteurs visuels mais aussi par des facteurs plus abstraits liés aux connaissances puisque de tels effets ne peuvent s'observer que si le lecteur connaît la structure orthographique des mots de la langue.

Pour conclure, les propriétés physiques des stimuli comme la luminance et la taille ainsi que leurs propriétés linguistiques, sont susceptibles de moduler l'effet global. Dans chaque cas, l'élément le plus saillant de la configuration visuelle agit comme un attracteur pour le regard et entraîne une déviation du centre de gravité et donc du point d'arrivée de la saccade vers cet élément. Si la taille et la luminance, qui sont des magnitudes continues non-numériques, partagent des ressources communes avec des magnitudes discrètes de numérosité comme le propose le modèle ATOM (Bueti & Walsh, 2009; Walsh, 2003), alors on peut s'attendre à ce que la perception des nombres sous forme symbolique module également l'effet global (i.e. déviation de la position d'arrivée de la saccade vers le stimulus le plus grand en taille, le plus lumineux, le plus grand numériquement), bien que la forme symbolique soit une propriété abstraite du chiffre. En effet, cette représentation nécessite que l'observateur connaisse le système de notation symbolique. Cette hypothèse s'appuie aussi sur l'existence d'une influence des propriétés abstraites sur l'effet global (Beauvillain & Doré, 1998; Beauvillain et al., 1996). Nous avons tenté dans l'**Article 2** de comprendre comment la magnitude numérique pouvait être une propriété saillante pour le système visuel dans un paradigme d'effet global à l'instar des propriétés physiques (e.g. luminance ou taille des stimuli).

4.3.2 Supprimer la cible saccadique

A la suite des résultats obtenus dans l'**Article 2**, qui ont montré un effet numérique faible sur les amplitudes saccadiques, nous avons souhaité comprendre si supprimer la cible saccadique serait favorable à l'émergence d'un effet numérique plus prononcé. Lorsqu'une seule cible, petite et proche de la croix de fixation, est présentée aux participants, la position d'arrivée de la saccade varie généralement peu. Par conséquent, il semble difficile d'observer des différences sur l'amplitude lorsque le participant réalise de petites saccades. La catégorisation des saccades a mis en évidence que certains types de saccades entraînent une plus grande variabilité intra-individuelle de l'amplitude saccadique. Par exemple, viser la position d'une cible maintenue en mémoire (saccades mémorisées) ou viser à l'opposé des coordonnées de la cible (anti-saccades) entraîne plus de variabilité. La plus grand variabilité des saccades s'observe tout d'abord par une augmentation des latences dans ce type de protocole mais aussi sur une augmentation de la variabilité des amplitudes saccadiques (Vergilino & Beauvillain, 2001).

Bien que les saccades mémorisées entraînent une plus grande variabilité, Fischer et ses collègues (2004) n'ont pas trouvé, avec ce type de saccades, d'effet SNARC sur l'amplitude. Néanmoins, leurs résultats montrent que les chiffres extrêmes tendent à induire des saccades plus grandes que les chiffres intermédiaires. Ceci s'apparente à un effet de distance sur l'amplitude saccadique. Si les participants se représentent les nombres sur une ligne mentale, une hypothèse serait que les chiffres extrêmes entraînent des mouvements plus grands. Au niveau des analyses statistiques, les auteurs ont évalué l'interaction entre la magnitude des nombres (0/1, 2/3, 4/5, 6/7, 8/9) et le côté de réponse mais n'ont pas effectué d'analyses statistiques en groupant les stimuli en fonction de leur distance par rapport au chiffre 5 (extrêmes *vs.* intermédiaires). L'analyse de l'interaction entre la magnitude des nombres et le côté de réponse n'est peut-être pas la plus adéquate. L'existence d'un effet SNARC sur les amplitudes pose question. Pour rappel, l'effet décrit une interaction entre une dimension numérique (i.e. la magnitude du chiffre) et une réponse motrice associée (i.e. effectuer une saccade vers la gauche ou vers la droite). Lorsque la position activée par le chiffre est congruente avec la réponse motrice, on observe des temps de réaction plus rapides, expliqué par le modèle de double-route (Gevers, Reynvoet, & Fias, 2003; Gevers et al., 2006). Ce modèle ne prédit pas directement un effet sur la taille du mouvement. En revanche, l'hypothèse *« plus A – plus B »* du modèle ATOM peut prédire que l'augmentation du nombre est susceptible d'entraîner une augmentation des paramètres moteurs, hypothèse confirmée par la récente étude sur les mouvements de glissement du doigt (Fischer, Fischer, Huber, Strauß, & Moeller, 2018). Puisque cette étude a montré un effet sur l'amplitude, il semble important d'examiner leur protocole expérimental. En effet, aucune cible n'était présentée au participant. De ce fait, il était libre

d'effectuer des petits ou grands mouvements, seule la direction du mouvement était imposée en fonction des caractéristiques du chiffre (magnitude ou parité). Des études ont aussi montré que lorsque la direction de la réponse est libre, le côté de réponse sélectionné est biaisé par la magnitude du stimulus (Daar & Pratt, 2008; Fernández, Rahona, Hervás, Vázquez, & Ulrich, 2011). Par exemple, lorsqu'on demande à un participant de déplacer son regard vers un des deux visages qui lui sont présentés en périphérie (sans consigne de direction), la magnitude d'un chiffre présenté en amorce au centre de l'écran influence son choix du côté de réponse (Fernández et al., 2011). Dans l'**Article 3** de cette thèse, nous avons testé l'hypothèse que l'absence d'une cible saccadique favorise l'émergence d'un effet numérique sur l'amplitude saccadique. Cette hypothèse semble pouvoir se généraliser à l'ensemble des paramètres moteurs dès lors qu'ils ne sont pas contraints par le dispositif expérimental (instruction de direction, présence d'une cible).

4.3.3 Déplacer la cible pendant la saccade : l'adaptation saccadique

Un autre moyen d'étudier les modifications de l'amplitude saccadique est d'utiliser l'**adaptation saccadique**, un mécanisme qui traduit la plasticité du système saccadique. Ce mécanisme permet de maintenir la précision de la visée saccadique par une recalibration du programme moteur suite à des erreurs de visée systématiquement répétées. Contrairement aux autres systèmes moteurs, une fois que la saccade est initiée, aucune correction du mouvement n'est possible. De ce fait, si des changements visuels apparaissent pendant l'exécution d'une saccade, ils ne seront pas immédiatement pris en compte par le système saccadique qui les traitera uniquement lors de la fixation qui suit le mouvement. Lorsque la position d'arrivée de la saccade ne correspond pas à la position visée (e.g. sur une cible visuelle), cela induit une erreur de visée. Le mécanisme d'adaptation saccadique permet de modifier le programme moteur pour faire correspondre la position d'arrivée de la saccade à celle visée par le système saccadique lorsque de telles erreurs sont systématiquement répétées. Ceci suggère que la sélection d'une cible saccadique est primordiale pour qu'une adaptation puisse se mettre en place (Collins, Vergilino-Perez, Beauvillain, & Doré-Mazars, 2007).

On peut observer de manière naturelle ce mécanisme d'adaptation à l'œuvre chez des patients qui présentent un dysfonctionnement des muscles extra-oculaires (Kommerell, Olivier, & Theopold, 1976). On peut aussi artificiellement créer des erreurs de visée en laboratoire en déplaçant la cible saccadique pendant la saccade, c'est le **paradigme du double-saut de cible** introduit par McLaughlin (1967). Le saut de la cible va créer artificiellement une erreur de visée, que le système saccadique va tenter de compenser en adaptant progressivement l'amplitude de saccade dans le but de réduire cette erreur. Le paradigme de double-saut de cible repose sur le phénomène de suppression saccadique, selon lequel la vision est réduite pendant l'exécution d'une saccade

(Bridgeman et al., 1975; Klingenhoefer & Bremmer, 2011). De ce fait, le déplacement de la cible n'est pas consciemment perçu par le sujet. Ce **déplacement intrasaccadique** peut être effectué dans le sens de la saccade, ce qui induit une **augmentation d'amplitude**, ou bien dans le sens opposé, qui induit une **diminution d'amplitude**. En général, la taille du saut intra-saccadique correspond à environ 25% de l'excentricité de la cible. Une correction parfaite de l'erreur de visée est rare, mais est facilitée lorsque la taille du déplacement de la cible augmente progressivement (Alahyane et al., 2007).

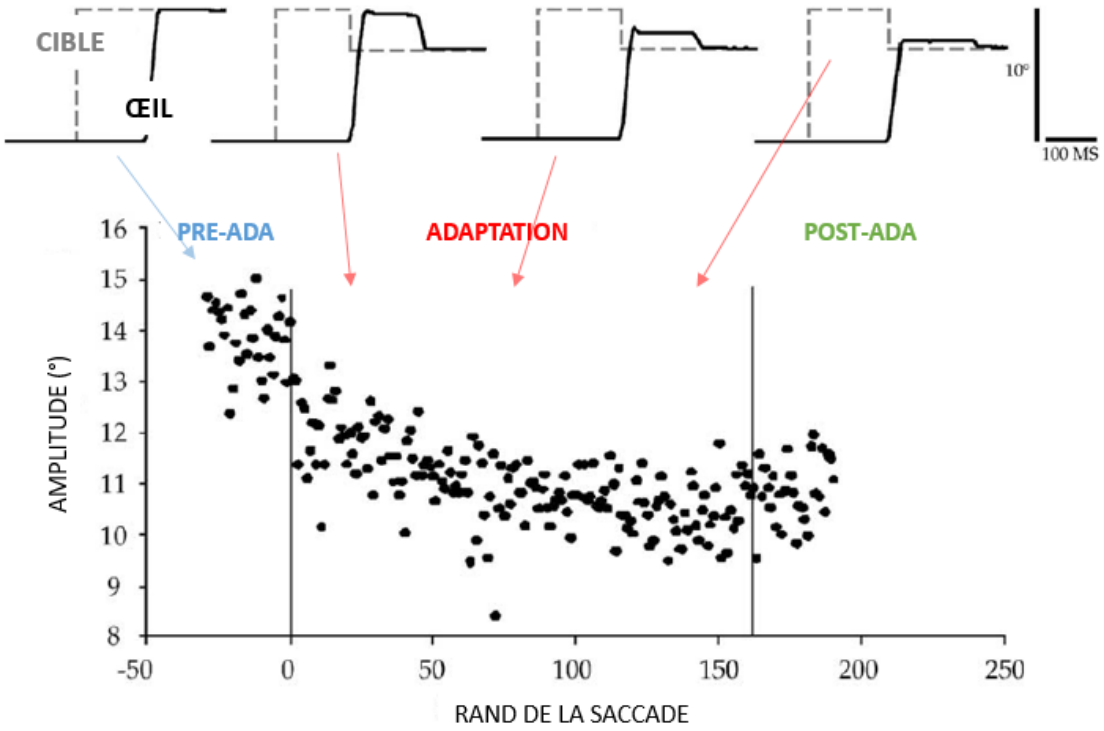

Figure 4.4 – Illustration de l'adaptation saccadique en diminution d'amplitude. L'amplitude de la saccade en degré est stable en phase de pré-adatation. Pendant la phase d'adaptation, la cible est déplacée de 2° dans la direction inverse de la saccade et l'amplitude diminue progressivement. En phase de post-adaptation, la cible n'est plus déplacée (comme en pré-adaptation). Figure adaptée de Hopp & Fuchs (2004).

Comme tout mécanisme, l'adaptation saccadique a ses caractéristiques. Elle se met en place progressivement et apparaît après 30 à 60 essais en laboratoire (Deubel, Wolf, & Hauske, 1986, voir Figure 4.4). Elle se maintient dans le temps dès lors que (1) le saut intra-saccadique est maintenu ou (2) qu'il n'y a pas de feedback visuel de la cible à l'arrivée de la saccade (Bahcall & Kowler, 2000). En effet, une rétention peut être observée jusqu'à 19 jours après la mise en place de l'adaptation saccadique chez certains sujets (Alahyane & Pélisson, 2005). Lorsque la cible n'est plus déplacée (*phase d'extinction ou post-adaptation*), le système saccadique retrouve une visée correcte vers cette cible au bout de quelques essais. En effet, un mécanisme inverse se met en place, à savoir une

adaptation dans le sens inverse de celle induite. Dans le cas d'une adaptation en augmentation d'amplitude, la mise en place est cependant plus lente (Bahcall & Kowler, 2000; Noto et al., 1999) et l'extinction plus rapide en comparaison à une adaptation en diminution d'amplitude (Straube et al., 1997 chez le singe). Ceci suggère que deux mécanismes distincts sous-tendent les deux types d'adaptation.

Une des spécificités de l'adaptation saccadique réside dans la notion de transfert. L'adaptation d'une saccade de référence transfère aux vecteurs moteurs ayant une composante proche de celui-ci. On appelle champ adaptatif la fenêtre spatiale restreinte autour de cette saccade de référence (Alahyane, Koene, & Pélisson, 2004; Collins, Doré-Mazars, & Lappe, 2007). Ce transfert d'adaptation a lieu uniquement pour des saccades ayant la même direction, et sera dépendant de l'amplitude du vecteur saccadique. De ce fait, il est possible d'induire les deux types d'adaptation saccadique (i.e. en augmentation et en diminution d'amplitude) pour deux vecteurs différents à condition que leurs champs adaptatifs respectifs ne se chevauchent pas. L'adaptation n'est par contre pas spécifique des caractéristiques de taille ou de couleur de la cible (Deubel, 1995). Dans la littérature, certaines études ont montré qu'une recalibration motrice pouvait induire des changements perceptifs de notre environnement visuel (voir Zimmermann & Lappe, 2016 pour une revue). En effet, l'adaptation saccadique s'accompagne de changements perceptifs dans le champ adaptatif. Par exemple, les participants devaient localiser un objet spatialement proche de la cible saccadique juste avant l'exécution d'une saccade (Bruno & Morrone, 2007; Collins, Doré-Mazars, et al., 2007; Zimmermann & Lappe, 2010). Lorsque les saccades étaient adaptées, la localisation perçue de l'objet était déviée en direction de l'adaptation saccadique (Bruno & Morrone, 2007; Collins, Doré-Mazars, et al., 2007; Zimmermann & Lappe, 2010). On retrouve les mêmes résultats si, dans certains essais, on éteint la cible saccadique pendant la saccade. L'erreur de localisation ne serait pas due au déplacement de la cible en lui-même mais au changement de la commande motrice. Effectuer la localisation tout en maintenant le regard fixé sur le point de fixation (donc pas d'adaptation saccadique) n'entraîne pas de telles erreurs de localisation.

Si dans un paradigme d'adaptation saccadique le changement de la commande motrice induit des changements de perception de localisation, manipuler des paramètres liés aux caractéristiques des objets pourrait offrir également une compréhension de ces processus. Plus spécifiquement, dans le cadre de cette thèse, l'adaptation saccadique nous semble être un moyen privilégié pour modifier la magnitude de la commande motrice (i.e. de l'amplitude saccadique) et pour étudier ses conséquences perceptives. Récemment, une étude a montré que l'adaptation de saccades induite par un changement intra-saccadique de la taille d'un objet avait modifié la taille perçue de cet objet (Bosco, Lappe, & Fattori, 2015). Les participants devaient effectuer une saccade vers un objet dont la longueur augmentait ou diminuait pendant l'exécution de la saccade. A la fin de chaque essai, les

participants devaient estimer la taille de l'objet soit de façon manuelle via l'ouverture de leur main soit verbalement en millimètres. Cette manipulation a induit non seulement une adaptation saccadique (augmentation / réduction d'amplitude de la saccade selon l'augmentation / diminutation de la taille de l'objet) mais également une modification de la taille perçue de l'objet dans le même sens. Une augmentation/diminution de la taille de l'objet a entraîné une augmentation/diminution de l'amplitude des saccades et d'estimation de la taille de l'objet. Ce résultat suggère que des caractéristiques perceptives propres à l'objet sont susceptibles d'être modifiée par un changement moteur (Bosco et al., 2015; Valsecchi, Gegenfurtner, Valsecchi, & Gegenfurtner, 2016) et coïncident avec l'hypothèse « plus A-plus B » (Walsh, 2003). Néanmoins, le protocole expérimental ne permet pas de savoir si le changement de taille perçue est une conséquence du changement moteur lui-même (i.e. modification de l'amplitude) ou bien est dû au changement intra-saccadique de la taille de l'objet. En effet, peut-être que le changement de taille pendant la saccade sans adaptation saccadique aurait induit une sous-estimation ou une surestimation de la taille perçue de l'objet. Nous souhaitions examiner la deuxième possibilité, à savoir si le changement moteur induit par l'adaptation saccadique et sans changement de taille de l'objet pendant la saccade entraîne un changement perceptif. Dans l'Article 4, nous avons donc testé directement l'impact de l'adaptation saccadique sur la perception de taille d'un objet dont la taille ne varie pas pendant la saccade.

Objectifs de la thèse

Au vu de la littérature, plusieurs questionnements sur les liens entre magnitudes perceptives et magnitudes motrices subsistent. L'objectif principal de cette thèse est de comprendre quel est le **rôle des paramètres moteurs dans le modèle ATOM** proposé par Walsh en 2003. La réponse motrice est-elle seulement une sortie, reflétant les interactions entre les informations numériques, spatiales et temporelles, ou bien, les paramètres de l'action partagent-ils un système de magnitude commun avec les dimensions perceptives ? Dans le second cas, des influences réciproques devraient être observées entre la perception et le mouvement, bien qu'elles puissent être asymétriques selon les magnitudes considérées (voir Winter, Marghetis, et al., 2015 pour les hypothèses d'asymétries). Cette thèse a pour objectif d'examiner la place de l'action dans le système commun de magnitude au temps, à l'espace et au nombre dans le système visuo-moteur. Le système saccadique sera utilisé comme modèle du système moteur humain.

Dans un premier axe, nous avons étudié comment la perception des informations numériques en lien avec leurs représentations spatiales impactent les paramètres saccadiques. L'**Article 1,** présentée dans cette thèse, a examiné l'effet SNARC classique (Dehaene et al., 1993) sur des temps de réponse saccadique en comparaison à des réponses manuelles en présentant des chiffres sous leur forme arabe ou écrite en toutes lettres. Les résultats de cet Article nous permettent de comprendre les spécificités du système visuel dans le cadre des interactions nombre-espace, particulièrement la variabilité des temps de traitement selon la nature du chiffre et de l'effecteur. Si ce type de paradigme n'a pas permis d'obtenir un effet sur l'amplitude de la saccade comme pour Fischer et ses collègues (2004), l'expérience que présente **Article 2** s'est construite autour du paradigme d'effet global afin examiner comment le traitement spatio-numérique module l'amplitude saccadique. Ce paradigme, qui permet de modifier l'amplitude d'une saccade (Findlay, 1982) par la présence d'un distracteur proche de la cible, a été utilisé en présentant des chiffres à la fois en tant que distracteur et cible. Dans un effet global classique, la position d'arrivée de la saccade correspond généralement avec le centre de gravité de la configuration visuelle des éléments. Un élément plus grand en taille ou plus lumineux est connu pour dévier la position d'arrivée de la saccade vers lui, conséquent à la déviation du centre de gravité de la configuration. Notre expérience a testé si la magnitude numérique est une dimension saillante permettant de moduler l'effet global comme la taille ou la luminance des stimuli visuels. La pondération du centre de gravité par la magnitude numérique des éléments de la configuration trouvée étant faible, l'**Article 3** a été réalisée afin d'examiner les interactions entre le traitement numérique et l'amplitude saccadique avec un autre protocole, inspiré des travaux de Fischer et ses collaborateurs sur des mouvements de glissement du

doigt (Fischer et al., 2018). Les résultats des **Articles 1, 2 et 3** permettent de mettre en avant les conditions qui favorisent l'émergence des associations spatio-numériques à la fois sur la latence saccadique mais également sur l'amplitude saccadique.

Plus concerné par les conséquences sensori-motrices des traitements perceptifs, le modèle ATOM ne pose pas la question d'une influence réciproque (de l'action sur la perception). Pourtant certaines théories suggèrent que l'action vers un objet peut aussi modifier la façon dont nous le percevons. Les théories idéomotrices évoquent des bases communes pour la perception et l'action et nous avons vu que la perception visuelle peut également être impactée par des modifications de la commande motrice (e.g. Zimmermann & Lappe, 2016). **Dans un second axe**, nous avons tenté de répondre à la question d'un impact de l'action sur la perception en utilisant la recalibration du mouvement (adaptation saccadique) induite par le protocole de saut de cible. Les hypothèses étaient que la modification de l'amplitude saccadique entraîne des changements perceptifs de la magnitude des propriétés intrinsèques d'un objet visuel comme sa taille (**Article 4**) ou de sa durée (**Etude 5**).

Montrer que (1) la perception des magnitudes numériques entraîne des modifications non seulement des paramètres temporels (i.e. latence) mais aussi cinématiques de la saccade (i.e. amplitude) et que (2) des modifications motrices entraînent des changements perceptifs de la taille et du temps, seraient des arguments forts en faveur d'un système commun pour les deux systèmes d'action et de perception, calibrant leur magnitude sur les autres dimensions.

CONTRIBUTION EXPERIMENTALE

INTERACTIONS ENTRE LE SYSTEME SACCADIQUE ET LE TRAITEMENT DES MAGNITUDES PERCEPTIVES

SOMMAIRE

1 Axe 1 : influence du traitement numérique sur la réponse saccadique _____ 86

1.1 Article 1– Time-dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. 88

1.2 Poster 1 – Étude comparative en oculométrie de l'effet SNARC induit par des stimuli linguistiques numériques versus conceptuels 100

1.3 Article 2 – Saccades toward a digit: does numerical magnitude modulate saccadic parameters? 103

1.4 Article 3 – How does number magnitude influence temporal and spatial parameters of eye movements? 124

POINTS-CLES 141

2 Axe 2 : influence des changements moteurs sur la perception _____ 143

2.1 Article 4 – Saccadic adaptation shapes perceived size: Common codes for action and perception. 145

2.2 Etude 5 – l'impact de l'adaptation saccadique sur la perception temporelle 165

POINTS-CLES 167

1 Axe 1 : influence du traitement numérique sur la réponse saccadique

Le premier objectif de cette thèse était d'examiner l'impact du traitement numérique sur les paramètres spatio-temporels de la réponse saccadique. Pour cela, des protocoles classiques induisant l'effet SNARC (Dehaene et al., 1993) et des paradigmes expérimentaux empruntés à la littérature dédiée au fonctionnement du système saccadique (e.g. effet global, Findlay, 1982) ont permis d'explorer le lien entre nombre et action.

Dans toutes les études présentées ci-après, les participants devaient réaliser des saccades horizontales vers un stimulus visuel (excepté pour l'Article 3 dans lequel aucune cible saccadique n'était présentée). Des stimuli numériques ont été présentés aux participants sous leur forme symbolique, le plus souvent en chiffres arabes (sauf l'étude du Poster 1 qui a utilisé des mots de la langue française faisant référence à des petites ou grandes quantités (e.g. « binôme », « troupe »). Selon l'étude, le traitement des propriétés du chiffre (e.g. grandeur numérique, parité) pouvait être nécessaire pour diriger la saccade (la direction de la saccade était alors conditionnée par une propriété du chiffre). Autrement, une tâche perceptive était proposée une fois la saccade réalisée afin de vérifier si l'information numérique a été traitée avec succès. Les mouvements des yeux étaient enregistrés grâce à un oculomètre EyeLink 1000 (SR Research). Les analyses avaient pour but d'examiner l'effet des propriétés numériques (ordre de grandeur, distance relative par rapport à chiffre de référence, parité) sur la latence et l'amplitude saccadique.

L'**Article 1** et l'**Etude 1** avaient pour objectif de répliquer l'effet SNARC sur les latences saccadiques avec des stimuli numériques de différents formats (chiffres arabes *vs*. mots de chiffres). Les résultats de ces expériences ont mis en avant que les associations spatio-numériques, bien qu'elles soient jugées automatiques, ne sont pas systématiquement reflétées sur les temps d'initiation des réponses motrices mais seraient plutôt dépendantes du temps d'intégration de l'information numérique et du temps d'initiation de la réponse motrice selon l'effecteur utilisé. Les **Articles 2 et 3** ont spécifiquement examiné l'impact d'un chiffre sur l'amplitude saccadique. Pour ce faire, le paradigme d'effet global, qui modifie l'amplitude de la saccade via la présentation d'un distracteur proche de la cible, a été utilisé afin d'examiner comment la taille numérique des chiffres (présentés comme cible saccadique et distracteur) peut moduler la position d'arrivée de la saccade à l'instar de sa taille physique ou de sa luminance (**Article 2**). A notre connaissance, l'effet global avec des chiffres ne semble pas avoir été testé, son utilisation est donc une façon innovante d'étudier les liens entre la cognition numérique et l'action. Les participants devaient réaliser des saccades vers un chiffre, présenté seul ou accompagné d'un autre chiffre. Les chiffres présentés pouvaient varier en intensité lumineuse et en magnitude numérique. Nos résultats ont montré que les propriétés

numériques des stimuli impactent non seulement la visée d'un chiffre présenté seul mais également de l'effet global. Néanmoins, la modulation de l'effet global par les propriétés numériques n'est possible que dans la condition dans laquelle la luminosité du chiffre est congruente avec la taille numérique (e.g. plus grand numériquement et plus lumineux). Afin d'approfondir cet effet du traitement numérique, nous nous sommes inspirées d'un récent article de Fischer et al. (2018), publié fin 2018, dans lequel l'amplitude des mouvements de glissement de doigts est corrélée avec la magnitude numérique du stimulus. Les participants devaient déplacer une croix avec leur index sur un écran, à gauche ou à droite selon les propriétés du chiffre présenté au centre (tâche de parité et tâche de comparaison de magnitude). Dans leur protocole expérimental, aucune cible motrice n'était prédéfinie. Les participants pouvaient effectuer un mouvement de taille libre. Nous avons fait l'hypothèse que c'est précisément l'absence de cible qui a favorisé l'émergence des effets numériques sur l'amplitude du mouvement. L'**Article 3,** avec un paradigme expérimental très similaire au leur, a vérifié avec succès cette hypothèse sur des réponses saccadiques sans cible visuelle.

1.1 Article 1– Time-dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses.

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., & Doré-Mazars, K. (2018). Time dependency of the SNARC effect for different number formats : evidence from saccadic responses. *Psychological research*, 1-11. doi : 10.1007/s00426-018-1010-y

RESUME

L'objectif de cette étude était d'examiner l'impact du temps de traitement sur l'effet SNARC (Spatial-Numerical Association of Responses Codes, Dehaene et al., 1993), lequel décrit des temps de réaction plus rapides dans l'espace gauche pour les petits chiffres et plus rapides dans l'espace droit pour les grands chiffres. Cet effet s'expliquerait par le fait que la magnitude numérique est associée aux localisations dans l'espace. Si un grand nombre d'études se sont intéressées aux modulations de cet effet, en testant différents effecteurs (e.g. main, yeux), différents formats de présentation du chiffre (e.g. Arabe, Mots) ou différentes natures de tâches (e.g. jugement de parité, comparaison de magnitude), la façon dont il est modulé par les latences des réponses n'a jamais été directement testée. Dans notre étude, 48 participants devaient réaliser une tâche de parité (pair *vs*. impair) en réponse à des chiffres arabes et des chiffres écrits en toutes lettres (mots de chiffres). Dans deux conditions, la consigne était de répondre soit (1) en effectuant une saccade vers une cible placée à droite ou à gauche soit (2) en appuyant sur le bouton placé à droite ou à gauche avec leur main droite ou gauche. Si l'effet SNARC a été répliqué sur les réponses manuelles pour les deux formats (Arabes / Mots), cela n'a pas été le cas sur les réponses saccadiques puisque cet effet a seulement été observé pour les chiffres arabes. Selon notre interprétation, cela s'expliquerait par le fait que le temps d'initiation de la saccade, plus court que celui de la réponse manuelle, n'est pas assez long pour permettre l'activation de la magnitude et de son association avec l'espace, en particulier lorsque les chiffres sont présentés sous leur forme écrite. En effet, le traitement de ces derniers est connu pour être plus long que celui des chiffres arabes. De façon intéressante, le temps de réponse des individus était positivement corrélé avec la taille de l'effet SNARC. Le temps de traitement du chiffre selon son format de présentation et celui d'initiation de la réponse motrice (différences individuelles et liées à l'effecteur) semblent donc avoir un rôle critique dans l'émergence et la force de l'effet SNARC, et fournit ainsi un cadre cohérent pour interpréter les associations spatio-numériques.

Psychological Research
https://doi.org/10.1007/s00426-018-1010-y

ORIGINAL ARTICLE

Time dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses

Alexandra Pressigout[1] · Agnès Charvillat[1] · Karima Mersad[1] · Karine Doré-Mazars[1]

Received: 16 February 2018 / Accepted: 7 April 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract
In line with the suggestion that the strength of the spatial numerical association of response codes (SNARC) effect was time dependent, the aim of the present study was to assess whether the association strength depends on the processing time of numerical quantity and/or of the time to initiate responses. More specifically, we examined whether and how the SNARC effect could be modulated by number format and effector type. Experiment 1 compared the effect induced by Arabic numbers and number words on the basis of saccadic responses in a parity judgment task. Indeed, previous studies have shown that Arabic numbers lead to faster processing than number words. The results replicated the SNARC effect with Arabic numbers, but not with number words. Experiment 2 was similar to Experiment 1, but this time manual responses (i.e., responses far slower than saccadic ones) were recorded. A strong SNARC effect was observed for both number formats. Further analyses revealed a correlation between mean individual response times and the strength of the SNARC effect. We proposed that the initiation times for saccadic responses may be too short for the SNARC effect to appear, in particular with the written number format for which activation of magnitude takes time. We conclude in terms of time variations resulting from processing specificities related with number format, effector type and also individual reaction and processing speed.

Introduction

The mental number line (MNL) metaphor describes the representation of number magnitude on a line spatially oriented from left to right in Western cultures, with small and large numbers represented, respectively, on the left and the right of the MNL. The most famous behavioral outcome of the space–number association matching the MNL is the SNARC effect (spatial numerical association of response codes) initially demonstrated by Dehaene, Bossini and Giraux (1993). In a series of experiments, they showed that humans were faster to respond manually to small numbers when responses were produced with the left hand and to large numbers when they were produced with the right hand. A number of studies have replicated this effect (see Wood, Willmes, Nuerk & Fischer, 2008 for a meta-analysis) using different effectors (Loetscher, Schwarz, Schubiger & Brugger, 2008; Hesse, Fiehler & Bremmer, 2015), number formats (dots: Wood, Nuerk & Willmes, 2006; number words: Dehaene et al., 1993; Nuerk, Wood & Willmes, 2005; and even non-numerical stimuli: see Macnamara, Keage, & Loetscher, 2018 for a meta-analysis) or tasks involving implicit or explicit activation of magnitude (Gevers, Verguts, Reynvoet, Caessens & Fias, 2006; Fias, 1996; Roettger & Domahs, 2015). These findings have led to the conclusion that the SNARC is a robust effect, and that numbers automatically activate a mental representation of magnitude, regardless of whether or not magnitude is relevant to the task or could be ignored (as in implicit tasks).

Although most early studies reporting this effect mainly used manual reaction times; it soon became clear that considering eye movement behavior could provide a real added value (see Hartmann & Fischer, 2016 and Mock, Huber, Klein, & Moeller, 2016 for an overview). Indeed, eye-tracking studies have revealed that the space–number association influences the entire spectrum of cognitive processing,

✉ Alexandra Pressigout
alexandra.pressigout@parisdescartes.fr

Agnès Charvillat
agnes.charvillat@parisdescartes.fr

Karima Mersad
karima.mersad@parisdescartes.fr

Karine Doré-Mazars
karine.dore@parisdescartes.fr

[1] Laboratoire Vision Action Cognition, EA7326, Institut de Psychologie, Université Paris Descartes, 71 Avenue Édouard Vaillant, 92774 Boulogne-Billancourt Cedex, France

Published online: 09 April 2018

potentially inducing perceptive (Fischer, 2001) as well as attentional biaises (Fischer, Castel, Dodd & Pratt, 2003, Bulf, Cassia & de Hevia, 2014, van Dijck, Abrahamse, Acar, Ketels & Fias, 2014). For example, in a task where participants had to judge the order of apparition of two light flashes preceded by a digital prime (Casarotti, Michielin, Zorzi & Umiltà, 2007), responses revealed a perception bias such that after small numbers, participants tended to report that the first flash appeared on the left, while after large ones they tended to report that it appeared on the right. Likewise, in a simple target detection task, irrelevant and non-predictive prime numbers decreased reaction times when the side activated by number magnitude on the MNL was congruent with the side of the target (Fischer et al., 2003, Bulf et al., 2014). Moreover, an oculomotor bias was first reported by Fischer, Warlop, Hill and Fias (2004): in a parity judgment task, eye movements were initiated faster to reach, respectively, a left target in response to small numbers and a right target in response to large numbers. Schwarz and Keus (2004) extended this finding to both saccadic responses and to the vertical axis (small numbers/downward eye movements, and large numbers/upward eye movements). The issue of the "sensory-to-motor mapping involved in generating the SNARC and of whether these mappings are identical for different effectors within subjects" was recently tackled by Hesse et al. (2015, p. 180). In an auditory parity judgment task, these authors checked the presence of the SNARC with three effectors: the eye, the arm and the second finger. Their results showed a SNARC effect in the three conditions, but the individual strength of the effect did not correlate between the eye and the two other effectors. This result shows that the SNARC effect is somehow effector specific and suggests that saccadic and manual responses should be considered differently. One possible explanation for this difference is that the nature of sensory-to-motor mappings underlying the link between space and time varies across effectors, and between manual and ocular systems. In these studies of the SNARC effect based on eye movements, Fischer et al. (2003, 2004) found that experimental conditions modulated saccadic latency but not saccadic amplitude, suggesting that number magnitude influences motor planning rather than motor execution. More generally, a number of studies reported interactions between number and oculomotor behavior impacting eye fixations (Myachykov, Ellis, Cangelosi & Fischer, 2016) or free-gaze shifts (Loetscher, Bockisch & Brugger, 2008; Loetscher, Bockisch, Nicholls & Brugger, 2010). Overall, it is widely agreed that the spatial representation from left to right of number magnitude influences oculomotor actions and is even present in the first years of life (Bulf, de Hevia & Cassia, 2016; see also Rugani & de Hevia, 2017).

The SNARC effect, mainly investigated with the presentation of Arabic numbers, has now been extended to other quantity formats like number words (Dehaene et al., 1993; Fias, 2001; Nuerk, Iversen & Willmes, 2004; Nuerk et al., 2005), which also differ in their processing time. It is usually assumed that these two number formats show processing disparities, especially when they are presented in separate experimental blocks (Damian, 2004; Brysbaert, 2018). Magnitude information is activated faster from Arabic numerals than from number words. Fias (2001) regards this timing asymmetry as evidence for two distinct routes in the processing of verbal numerals. Compared with number words, Arabic numbers entail a faster and more direct activation of semantic and conceptual information (Glaser, 1992; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001). Some studies reported a weaker SNARC effect for number words than for Arabic numbers (Dehaene et al., 1993; Fias, 1996, 2001), while others found a quite uniform effect across formats (Nuerk et al., 2005; Wood et al., 2008). However, there is clear evidence that the strength of the effect varies depending on task demands. For number words, when a task requires a semantic processing (e.g., classification or parity judgment), the SNARC effect emerges, but it does not when the task implies surface processing as phoneme detection (Fias, 2001). This processing depth demand does not apply to Arabic numbers, as the mere sight of an Arabic number is enough to activate its magnitude and to associate it with a spatial code.

To our knowledge, the SNARC effect on saccadic responses has not been explored with number words, which is quite surprising considering the large number of studies in this field. Knowing that saccadic responses are initiated faster than manual ones, the question we ask in the present study is the following: are subjects' saccadic response latencies long enough to activate the magnitude representation of numbers and associate it with an element of the extracorporal space, regardless of number format? More broadly, our study aims to determine whether the time course of processing in saccadic responses affects the strength of the SNARC. How the SNARC effect depends on response latency has already been discussed. First, Wood et al. (2008) observed a stronger effect for longer response latencies: their meta-analysis revealed a positive correlation between the effect size and response latencies across 45 independent experiments (including different tasks, effectors and stimulus formats). Further investigations by Roettger and Domahs (2015) also reported a more pronounced SNARC in late manual responses when rank ordering subjects' response latencies, but other studies focusing on the relation between processing time and the strength of the SNARC effect failed to find it (Fias, 2001; Wood et al., 2006). In any case, the dual-route model proposed by Gevers et al. (2006) does support the idea of a greater SNARC effect on late response times.

On that basis, our first hypothesis predicts a stronger SNARC effect on Arabic numbers than on number words. Our second hypothesis predicts the existence of a correlation

between response times and the strength of the SNARC effect in both number formats. To shed light on the time dependency of the SNARC effect, the present study compares, on the basis of saccadic responses, the effect induced by Arabic numbers (implying a fast processing), and by number words (characterized by a slower processing) on parity judgments. In addition to the replication of the SNARC effect with Arabic numbers, we expected its generalization to number words. However, we have failed to obtain a SNARC effect with number words on saccadic responses. Therefore, to replicate the findings of previous studies, we decided to run a second experiment based on the same experimental design and the same materials (Arabic numbers and number words), but using manual responses. The SNARC effect was found for both number formats. Complementary analyses focused on the comparison between two effectors (eye vs. hand) varying in their response latencies, and between two number formats implying different magnitude activation delays. Regardless of effector type, we expected the SNARC effect to be stronger following the presentation of Arabic numbers rather than number words. Combining formats and effectors, we expected that the SNARC effect would reach its maximum with manual responses to Arabic numbers and its minimum with saccadic responses to number words.

Experiment 1

The aim of Experiment 1 was to investigate whether the SNARC effect induced by number words on saccadic responses was comparable to the one induced by Arabic numbers. We chose the parity judgment task for two reasons: (1) because it allows the activation of magnitude in both number formats and (2) because we wanted our results to be comparable with those from previous studies showing a SNARC effect in similar conditions.

Participants

Thirty-two students of Paris Descartes University volunteered for the experiment (22 females, mean age = 22.8 ± 6.23 years). All participants were right-handed, French native speakers, had normal or corrected-to-normal vision and none reported mental or neurological disorders. All were naïve about the purpose of the experiment and signed an informed consent form prior to the experiment. The procedures adhered to the principles of the Declaration of Helsinki.

Stimuli and material

Each participant was seated in a dark room in front of a VGA iiyama screen, resting his/her head on a chin rest and head restraint. Distance between the participant's eyes and the screen was 57 cm. Right eye movements were recorded with an EyeLink® 1000 (SR Research, Ontario CA) at a sampling rate of 1000 Hz and spatial resolution of 0.05°. The stimuli were numbers from 0 to 9 either in their Arabic format or in their written French format ("ZERO", "UN", "DEUX", "TROIS", "QUATRE", "CINQ", "SIX", "SEPT", "HUIT", "NEUF"); they were presented in white, in uppercase (font Courier New, size 11) in the middle of a gray screen (128; 128; 128), resulting in 0.32 × 0.37 degrees visual angle. The fixation point was a cross composed of two bars of 0.5 degrees (11 × 11 pixels) and the two targets presented in the periphery were letter "X" appearing in uppercase. The experiment was set on Experiment Builder®.

Procedure

Participants performed a parity judgment task on numbers in two conditions: Arabic number condition (AN) and number words condition (NW). Each condition included two experimental blocks of 90 trials with opposite response instructions ("look left for the even number and right for the odd number" and the reverse). The order of conditions and response sides was counterbalanced in four groups of participants.

At the beginning of each block, participants performed a calibration in nine points before running 10 practice trials (each number was presented once) and 80 experimental trials (each number was presented eight times). Each trial began with the appearance of a fixation cross in the middle of the screen within an invisible defined window of 1.5° × 1.5° centered on the fixation cross. The experimenter checked the fixation by pressing a button for drift correction to start the trial. Two targets appeared at 8° to the left and 8° to the right of the fixation cross during 500 ms, then the fixation cross was replaced by the number stimulus during 1300 ms. Participants were asked to look as quickly and accurately as possible either to the left or to the right target, depending on the given instructions. Saccades were detected when the amplitude reached 3°. Each trial ended with an empty screen displayed for 1500 ms before the next trial. Each block was followed by a short break. The experiment lasted about 60–90 min including questionnaires, instructions, and feedbacks on the experiment.

Data analysis

Saccadic response times were defined as the time between the onset of the number display and the onset of the saccade toward the target. We excluded the data from two stimuli: "0" because of its unclear parity status (Dehaene et al., 1993) and "5" to balance the number of small and large numbers. We removed from the analysis trials where

participants blinked before reaching the target (1.1%) or where they did not make saccade responses (1.1%). Then, incorrect responses were also excluded (4.1%). Finally, outlier trials (4.8%) were removed based on Tukey's rule (Carling, 2000). On average, 89% of trials were analyzable by subject.

Results and discussion

We performed a 2 (format: Arabic numbers vs. number words) × 2 (response side: left vs. right) × 2 (parity: odd vs. even) × 4 (magnitude bin: 1/2, 3/4, 6/7, 8/9) repeated measures ANOVA on correct saccadic responses (mean values ± standard error are presented in brackets). As preliminary analyses showed that the two counterbalanced factors (response side and condition order) had no systematic effects and did not interact with the SNARC effect (reflected by the interaction between response side and magnitude bin), they were removed from the subsequent analyses. There was a main effect of format [$F(1,31) = 5.66$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.15$], reflected in faster saccadic response times for Arabic numbers (523 ± 44 ms) than for number words (545 ± 37 ms); this expected result confirms that Arabic numbers are processed faster than number words in parity judgments. In line with previous studies (e.g., Hines, 1990; Nuerk et al., 2005), the main effect of parity was significant [$F(1,31) = 26.08$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.46$] with slower responses for odd digits (544 ± 38 ms) than for even ones (524 ± 36 ms). The main effect of magnitude bin was significant [$F(3,93) = 6.52$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.17$] due to the difference in response times between the 8/9 bin and the other bins. Response side had no significant effect [$p > .05$]. The following interactions were significant: parity × magnitude bin [$F(3,93) = 16.96$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.35$] and parity × response side [$F(1,31) = 5.95$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.16$] reflecting a MARC effect (markedness association of responses codes; Nuerk et al., 2004) with an advantage for saccades to the left for odd numbers and to the right for even numbers. With respect to the SNARC effect, the interaction between response side and magnitude bin was significant [$F(3,93) = 4.83$, $p < .01$, $\eta^2_p = 0.13$]. The non-significant three-way interaction between format, response side and magnitude bin [$F < 1$] suggests that the SNARC effect was similar for Arabic numbers and number words. Moreover, we found a significant three-way interaction between parity, response side and magnitude bin [$F(3,93) = 3.49$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.10$], due to faster saccadic responses to the right for number 2 (499 ± 14 ms) and slower saccadic responses to the right for number 1 (571 ± 16 ms).

To support these results, we used the method proposed by Fias (1996); it consists in visualizing the SNARC effect by means of a negative regression slope presenting reaction time differences between right and left responses as a function of number magnitude. For each participant, we thus calculated the difference between saccadic response times (dRTs) to the right side and to the left side for each number magnitude. A regression analysis was computed on dRTs with number magnitude as the predictor variable, and individual slopes were then tested against zero. For Arabic numbers, the mean coefficient slope (− 3.91) differed significantly from zero [$t(31) = -2.57$, $p = .015$], confirming the presence of the SNARC effect in this condition. Figure 1a shows the saccadic response time differences (right minus left) as a function of number magnitude for Arabic number condition, indicating faster responses to the left for small numbers and to the right for large numbers. For number words, the mean coefficient slope (−2.60) revealed a tendency for a SNARC effect but did not significantly differ from zero [$t(31) = -2.57$, $p = .10$, see Fig. 1b]. So, while the SNARC effect was clear for Arabic numbers, it was less so for number words; this is probably due to the 13 participants (about 1/3) who did not display any SNARC on this number format.

The following analyses were only performed on the number word condition. Due to the significant three-way interaction between parity, response side and magnitude bin, we decided to ensure that the SNARC effect was present

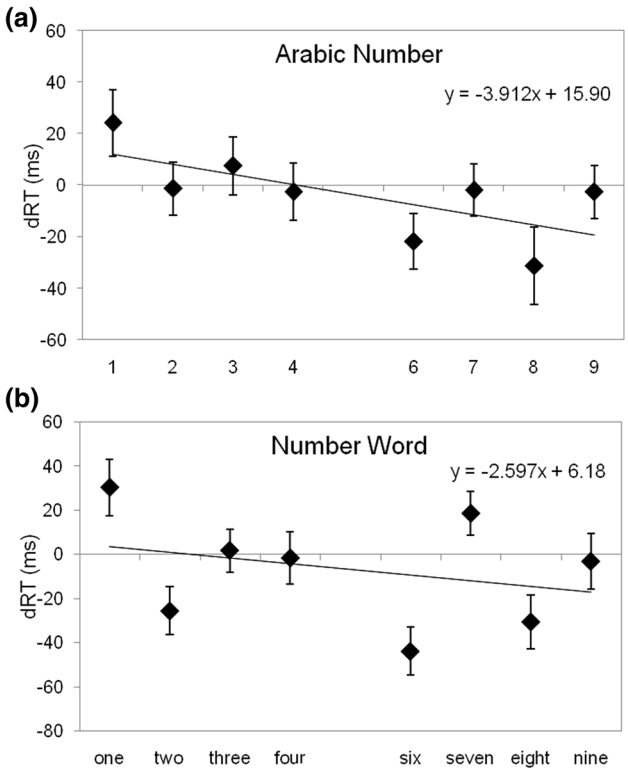

Fig. 1 Differences in response times (dRTs, in ms) between rightward and leftward saccades as a function of number magnitude for **a** Arabic number and for **b** number word. Error bars indicate standard error around the mean and solid lines represent linear regression

for both (even/odd) parity responses. To this end, we calculated individual regression slopes for odd (mean coefficient slope = −2.48) and even (mean coefficient slope = −2.83) numbers separately, and entered these values in a *t* test. The difference between the two mean slopes was not significant ($t(31) = 0.17$, $p = .86$) and revealed that the SNARC effect did not depend on number parity. A second analysis was performed on number words by aggregating small numbers (1,2,3,4) and large ones (6,7,8,9), resulting in a 2 (response side : left vs. right) × 2 (quantity : small vs. large) repeated measures ANOVA. This time, the interaction between response side and quantity reached significance [$F(1,31) = 4.25$, $p < .05$, $\eta^2_p = 0.12$], showing that for large numbers, saccadic responses were faster to the right (542 ± 9 ms) than to the left (558 ± 11 ms), whereas for small numbers saccade direction made no difference (left: 541 ± 10 ms, right: 542 ± 10 ms).

Twenty out of 32 participants showed a negative regression slope in both conditions, a proportion similar to that reported in previous studies. Among participants who did not show a SNARC effect, some had a reversed SNARC, which cannot be due to their reading habits because none was familiar with the right-to-left writing (see Shaki, Fischer & Petrusic, 2009, about the handwriting modulation on the SNARC). To evaluate the effect of processing time on the SNARC effect, for each subject we selected the two earliest (477 ± 63 ms) and the two latest (660 ± 122 ms) saccadic response times for each experimental condition (8 numbers, two response sides, two formats). We then calculated the difference between right and left response times for each subject and each number in both formats. This time-course analysis was similar to the median-split method used by Wood et al. (2006), and Roettger and Domahs (2015). The coefficient slope for late saccadic responses was 1.19, suggesting a mere tendency for a reversed SNARC effect [$p > .05$]. The coefficient slope for early saccadic responses (−1.09) did not differ from zero [$p > .05$] and was not different from the late saccadic responses group [$t(31) = 0.89$, $p = .38$]. On the basis of this analysis, one may conclude that latest response latencies of participants did not lead to a SNARC effect.

Parity judgments on Arabic numbers revealed a "saccadic SNARC effect", while in response to number words such an effect—investigated here for the first time—did not reach significance in the statistical analysis of the whole sample. A SNARC effect (slope < 0) was found for Arabic numbers in 20 participants and for number words in 19 participants (not necessarily the same persons). The coefficient slopes for participants showing a SNARC effect with Arabic numbers (−8.67) or with number words (−7.98) did not differ from each other [$t(37) = -0.31$, $p = .75$], showing that, surprisingly, the SNARC strength did not vary as a function of number format. Likewise, the strength of the reversed SNARC for participants with a positive coefficient did not differ either between the two format conditions [AN: 4.02; NW: 5.28; $t(23) = -0.87$, $p = .39$]. This result is inconsistent with our expectation of a smaller effect for number words due to the extra processing time they require compared to Arabic numbers.

Experiment 2

With a procedure identical to that of Experiment 1, Experiment 2 uses a parity judgement task based on manual responses to Arabic number (AN) and numbers words (NW). In line with previously reported results (e.g., Dehaene et al., 1993), we predicted a SNARC effect on manual response times in both formats. Incidentally, this experiment should thus provide a validation for our experimental protocol. Among the two main sources of variation under consideration in our study (format type and effector type), note that both include a slower/faster processing discrepancy (AN/NW; eye/hand). Assuming that the strength of the SNARC effect is time dependent, Experiment 2 aims to check whether it will be more pronounced for manual responses than for saccadic ones (recorded in Experiment 1), as a result of the disparity between their respective response latencies.

Participants

Sixteen students of Paris Descartes University volunteered for the experiment (mean age = 21.31 ± 5.16 years, 16 females); all were right-handed, native French speakers, had normal or corrected-to-normal vision, and none reported mental or neurological disorders. None of them had participated in Experiment 1. They were naïve about the purpose of the experiment and signed an informed consent formula prior to the experiment.

Stimuli and material

The stimuli and material were the same as in Experiment 1, except that participants were asked to rest both their second fingers on a computer button: left finger on the left arrow and right finger on the right arrow. These two response buttons were 4 cm apart.

Procedure

The procedure was identical to that of Experiment 2, except that the two peripheral targets were removed from the screen. Participants were asked to press as quickly and accurately as possible on either the left or the right button, depending on the parity of the number and on the given instructions (odd/left, even/right or inversely). Participants were assigned to

one of four groups resulting from the counterbalancing of response side and numerical format. The experiment lasted about 60–90 min including questionnaires and oral and written feedback of the experiment.

Data analysis

Manual reaction times were recorded. As in Experiment 1 (and for the same reasons), the data from stimuli "0" and "5" were also excluded. Incorrect responses were excluded (5.5%) and outlier trials were removed (5.1%) based on Tukey's rule as defined in Experiment 1 (Carling, 2000). Overall, an average of 89.4% of subjects' trials could be analyzed.

Results and discussion

We performed a 2 (format: Arabic numbers vs. number words) × 2 (response side: left vs. right) × 2 (parity: odd vs. even) × 4 (magnitude bin: 1/2, 3/4, 6/7, 8/9) repeated measures ANOVA on correct manual responses. The two counterbalanced factors (condition order and response side instructions) were removed from subsequent analyses as they showed no main effect, and neither interacted with the SNARC effect (response side × magnitude bin). As for saccadic responses, there were main effects of format [AN : 604 ± 19 ms vs. NW : 647 ± 17 ms; $F(1,15) = 7.54$, $p = .01$, $\eta^2_p = 0.33$], of parity [odd : 639 ± 69 ms vs. even : 612 ± 63 ms; $F(1,15) = 18.36$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.55$] and of magnitude [$F(3,45) = 3.65$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.19$], the latter effect being reflected in different response times for the 1/2 bin and the 3/4 bin. The main effect of response side was significant [$F(1,15) = 6.43$, $p = .02$, $\eta^2_p = 0.29$], showing an advantage for right finger responses (618 ± 60 ms) compared with the left finger ones (634 ± 71 ms). The parity × magnitude bin interaction was significant [$F(3,15) = 19.03$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.55$] while the parity × response side interaction was not [$F(1,31) = 5.95$, $p = .02$, $\eta^2_p = .16$], indicating a lack of MARC effect on manual responses. The response side × magnitude bin interaction was significant [$F(3,45) = 7.92$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.35$], reflecting a SNARC effect, with shorter manual response times with the left finger for small numbers, and shorter manual response times with the right finger for large numbers. The non-significant three-way interaction between format, response side and magnitude bin [$F < 1$] suggests that the SNARC effect was similar for both number formats. No other interaction reached significance (all $p > .05$).

The coefficient slope for AN condition (−7.25) differed significantly from zero, [$t(15) = -2.47$, $p = .026$], as well as the coefficient slope for NW condition (−6.77), [$t(15) = -2.72$, $p = .015$]. Figure 2 shows the typical representation of the SNARC effect based on response time differences

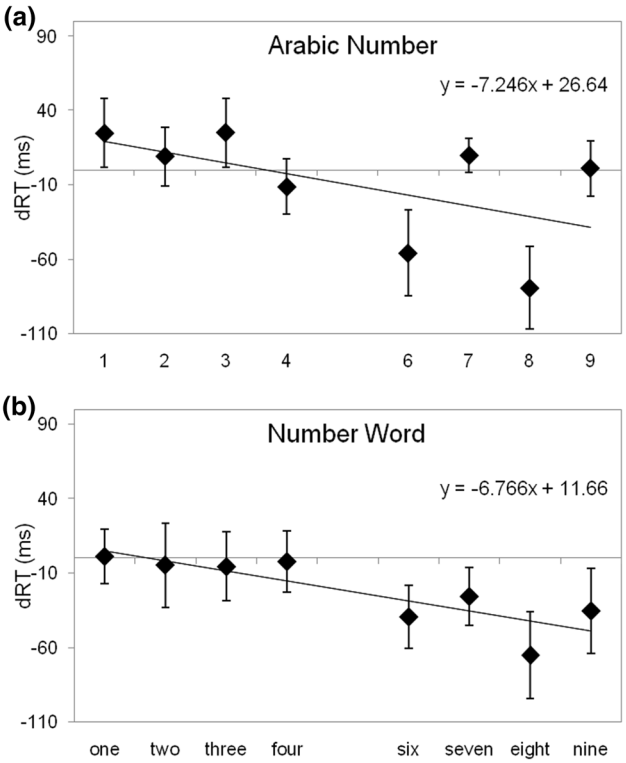

Fig. 2 Differences in response times (dRTs, in ms) between right and left hands as a function of number magnitude for **a** Arabic number and for **b** number word condition. Error bars indicate standard error around the mean and solid lines represent linear regression

(right minus left) as a function of number magnitude for both number format conditions.

This complementary analysis investigated the reliable presence of a SNARC effect on the basis of manual responses as a function of the number format. Indeed, both Arabic numbers and number words elicited a SNARC effect, small and large numbers being responded faster with, respectively, the left and the right hand. These findings differ from those obtained in Experiment 1, where the participants had to make saccadic responses. The main data of Experiments 1 (saccadic responses) and 2 (manual responses) are summarized in Table 1.

The data of one participant in Experiment 2 were removed from the following analyses, because her slope deviated from the mean slope by more than two standard deviations. In line with previous studies, mean saccadic responses were faster than manual responses and participants were faster to judge the parity of Arabic numbers than of number words (see Table 1). A positive Pearson-r-correlation was found for individual response times between Arabic number and number word conditions, for both saccadic ($r = .58$, $p < .001$) and manual responses ($r = .64$, $p = .01$); this result suggests that when a participant is fast in one format condition, he/she is likely to be fast in the other. Moreover, we found a

Table 1 Mean slopes, mean response times (RT in ms) and number of participants (N in percentages) displaying a negative slope for each number format and each effector

Experiment 1—saccadic responses		
$N = 32$	AN	NW
Mean slopes	−3.91 (±8.60)*	−2.60 (±8.68)
Mean RT (ms)	523.03 (±43.59)	545.24 (±37.24)
N with negative slopes	62.5%	59.4%
Experiment 2—manual responses		
$N = 16$	AN	NW
Mean slopes	−7.25 (±11.69)*	−6.77 (±9.94)*
Mean RT (ms)	604.27 (±77.23)	647.16 (±66.28)
N with negative slopes	68.8%	81.3%

AN arabic numbers, *NW* number words

**t* test; $p < .05$

positive Pearson-r-correlation among individual slopes between Arabic number and number word conditions for saccadic responses ($r = .44$, $p = .01$); this result suggests that when a participant shows a SNARC effect in one format condition, he/she is likely to show it as well in the other. So, although the space-based spatial numerical association differs between individuals, it seems to be consistently expressed within individuals across different numerical formats. We finally investigated the correlation between individual slopes and individual mean response times for each effector and each number format (see Fig. 3).

Correlation coefficients were negative in all conditions and only reached significance for Arabic numbers with manual responses and for number words with saccadic responses. The negative coefficient implies that longer reaction times correlate with stronger SNARC effects, confirming our

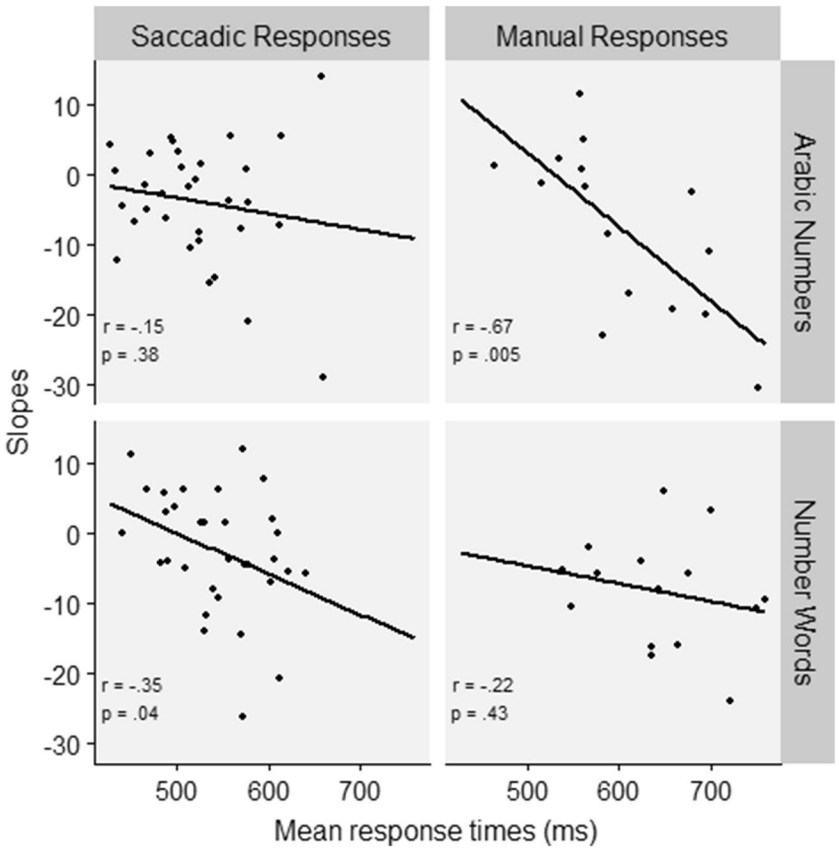

Fig. 3 Correlations between individual SNARC coefficient slopes and individual mean response times (in ms) as a function of number format, for saccadic and manual responses. Each data point represents a single subject. The black line represents the regression slope. Pearson-*r*-coefficient and *p* values for correlations are displayed inside the figure

hypothesis that long latencies would elicit stronger SNARC effects.

Based on the observation in our experiment and in the literature that 1/3 of participants usually do not show a SNARC effect, we split the participants to compare the first and the last third of participants ordered on their RTs, which represent the fastest and the slowest participants. In Fig. 4, we present the mean slope of each condition (number format × effector).

A clear difference between the mean coefficient slopes in both groups is observed, suggesting that relatively fast participants did not show—or exhibited a weaker—SNARC effect when compared to slower participants. This time effect is also conditioned by effectors, since the range of RTs obviously varies among effectors. Besides, the number format also seems to have an impact on the SNARC effect since the latter is not reflected in saccadic reaction times for number words. This format dependency does not extend to manual reaction times, suggesting that the number format is not crucial to the reflection of the SNARC effect on later responses. However in the case of earlier manual responses as well as saccadic ones, the number format influences the association between space and number. Recall that Arabic numbers have been characterized by their rapid activation of magnitude, whereas number words have been associated with a slower activation of magnitude. Hence, our results suggest that when numbers are expressed in letters, the time to initiate saccadic responses could be too short to allow a detectable number–space association. Ultimately, the SNARC effect is stronger when optimal conditions foster its emergence. Such conditions are met when slow latencies are combined with a quick activation of magnitude; this combination resulting in an increased interference between the conditional and the unconditional routes described in the dual-route model (Gevers et al., 2006).

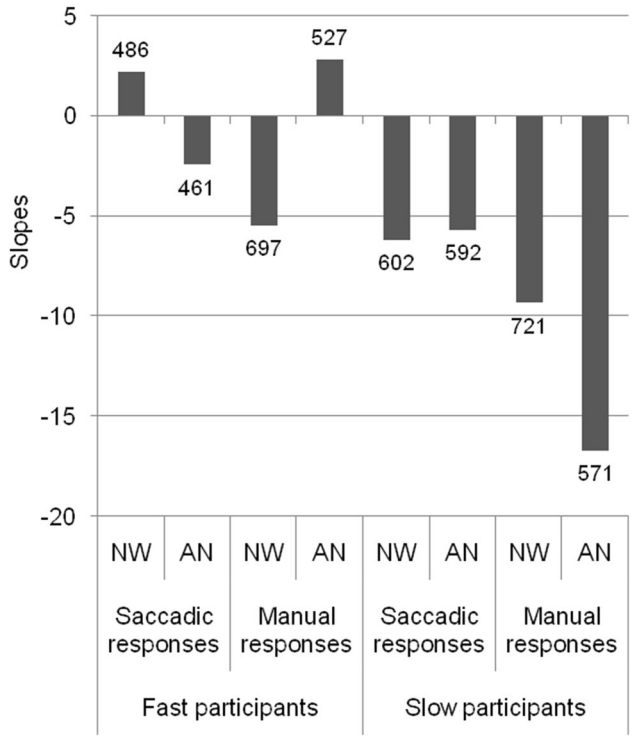

Fig. 4 Mean individual regression slopes as a function of number format (NW = number word and AN = Arabic number) and effector (saccadic and manual responses) for the first and final thirds of participants rank ordered by their mean response times (labeled fast vs. slow participants, respectively). Mean RTs (in ms) are indicated for each condition

General discussion

The goal of the present study was to assess whether the strength of the SNARC effect depends on the stimulus processing time and the time to initiate the response. In Experiment 1 we tested the SNARC effect induced by Arabic numbers or number words on saccadic response times in a parity judgment task. While we replicated the SNARC effect induced by Arabic numbers, results were much less clear for number words. In Experiment 2, based on manual response times, a SNARC effect with a similar strength was found for both number formats. Overall, these results support the claim of a format-independent SNARC effect on manual responses (Nuerk et al., 2005) and a format–dependent effect on saccadic responses. We hypothesized that the SNARC effect would be stronger when stimulus processing has short times and when response latencies are longer. First, the time to process numbers refers to the time required to activate the magnitude number, which depends on the number format: magnitude is activated faster by Arabic numbers than by number words. Second, the delay to initiate a response depends on the effector with which motor responses are given: saccadic response latencies are faster than manual ones. In line with the dual-route model (Gevers et al., 2006), we found that longer response times and faster magnitude activation are favorable conditions to reinforce the SNARC effect. Indeed, the dual-route model could account for these congruency effects in terms of two parallel processing paths, a conditional route related to task demands (e.g., the parity judgment task) and an unconditional route, more automatic, related to number magnitude activation and its associated localization (left vs. right). Both routes activate motor responses. In compatible trials, both of these routes lead to the same association between the spatial location activated by number magnitude and the spatial location of motor responses, which reduces response times and increases accuracy. In incompatible trials, these two routes lead to the opposite association, namely increased response times and reduced accuracy. The SNARC effect would result

from the interference between these routes. The slower the activation of magnitude, the greater should be the interference. According to this model, number format and effector type should modulate this interference; this will be discussed below. However, it seems clear that task demands should also modulate this effect because tasks (associated with the conditional route) will activate a response side at variable speed. Implicit tasks, for instance, are presumed to elicit a weaker SNARC effect than explicit ones, such as a magnitude comparison (Macnamara et al., 2018).

The role of processing time on the space–number association has sometimes been evoked in previous studies, highlighting the importance of the delay after digit onset on the attentional bias (Fischer et al., 2003; Fattorini, Pinto, Rotondaro & Doricchi, 2015) or on ocular drift during a fixation task using auditorily presented numbers (Myachykov, Cangelosi, Ellis & Fischer, 2015). According to these studies, a processing time around 700 ms should be necessary to produce an effect of magnitude on motor and perceptual responses. However, in these studies, numbers were irrelevant to task completion. When number is relevant, as in parity judgment, response times are usually shorter than 700 ms. In our study, we expected a modulation of the number–space interaction depending on individual timings of number magnitude activation and of motor preparation. We first conducted analyses that showed that SNARC slopes did not depend on saccadic response velocity. This result contrasts with previous studies using similar analyses based on the clustering of individual manual reaction time distributions (Wood et al., 2006; Roettger & Domahs, 2015), but is in line with others (Fias, 2001). As the dispersion of individual mean reaction times was rather large, for both saccadic and manual responses, we carried out further analyses that showed a negative correlation between SNARC slopes and individual mean reaction times for both effectors and both number formats. These correlations suggest that the SNARC effect needs time to emerge, which is compatible with the dual-route model (Gevers et al., 2006).

As far as the number format is concerned, we found that manual responses were faster for Arabic numbers than for number words, which is consistent with previous studies (e.g., Dehaene et al., 1993; Fias, 2001; Roettger & Domahs, 2015). Various asymmetries between Arabic numbers and of number words may be invoked to account for this difference in processing speed. First, number words are represented alphabetically while Arabic digits have a logographic representation and are viewed as objects; as a consequence they involve different cognitive and neurological mechanisms. Second, while number words are named faster than digits because they offer a more rapid access to phonological codes, Arabic digits are categorized faster because they offer a more direct access to semantic knowledge (Damian, 2004); this direct access seemingly leads to an automatic activation of magnitude information (Ford & Reynolds, 2016). In contrast to the proposal of an amodal SNARC effect (Nuerk et al., 2005), some authors proposed that the SNARC effect should be weaker for number words than for Arabic numbers (Dehaene et al., 1993; Fias, 2001). In our study, we found that manual responses reflect a SNARC effect regardless of the number format, but the pattern of results was different for saccadic responses. While the Arabic format still elicited a SNARC effect, no such effect was found for number words, mainly due to the fastest saccadic responses. Our results suggest a trade-off between the time to activate magnitude (which is format dependent) and the time to initiate motor responses (which is effector dependent). When magnitude activation is quickly achieved (as expected for Arabic numbers), more time is available for number–space associations, and motor response times become less critical. Conversely, when magnitude activation is achieved more slowly (as expected for number words), less time is available for number–space associations and motor response times play a more critical part.

Although the SNARC effect has mainly been found on manual responses, it had also been shown on saccadic responses (Fischer et al., 2004; Schwarz & Keus, 2004; Hesse et al., 2015). For example, having found no difference in the magnitude of the space–number association between saccadic and manual mean responses, Schwarz and Keus (2004) logically concluded that the SNARC effect was similar. Furthermore, Hesse et al. (2015) did not find individual correlations between manual and saccadic SNARC slopes, challenging the notion of an effector dependency of the SNARC effect. In our experiment, the mean SNARC slopes for saccadic and manual responses indicated a weaker SNARC effect for the eye effector. Given that our experimental design was highly similar for both effector conditions, this discrepancy may be accounted for in terms of movement: while saccadic responses require that the eyes move in a given direction, manual responses have no such requirement (hands are pre-positioned to respond). Interestingly, Hesse et al. (2015) compared the SNARC effect in three response conditions (button release, pointing and saccades). The two first implied the upper limbs and the latter the eyes, but pointing and saccades are both movements oriented in space. They found individual correlations between the two first conditions, but none of the latter correlated with saccades. So, we do not think that the specificity of motor responses in our study (button press vs. eye movement) can explain the slope differences we found. Even if it remains unclear whether sensory-to-motor mappings for saccadic and manual responses play equivalent parts in the emergence of space–number associations, the differences in response latencies seems a more likely contributor to our results. Indeed, the response time difference between hand

and eye effectors in our study is around 100 ms (close to the difference reported in the study of Hesse et al., 2015); if we are correct in assuming that short latencies hardly allow the emergence of SNARC effects, such a difference should be critical for saccadic responses, in particular with the written number format.

Finally, our results suggest that individual characteristics may also play a critical role in the strength of the SNARC effect. Actually, a number of previous studies have reported that approximately one-third of their participants do not show a SNARC effect (Wood et al., 2008 for an overview; Fitousi, Shaki & Algom, 2009; Hesse et al., 2015), a proportion which is consistent with our findings. This trend holds for Western cultures, as evidenced by the fact that several studies have shown reversed SNARC effects among participants with right-to-left reading habits (Zebian, 2005; Shaki et al., 2009; see also Fischer et al., 2009). Other potential sources of variation of the SNARC effect have been highlighted, such as gender (Bull, Cleland & Mitchell, 2013), counting habits (Fischer, 2008; Lindemann, Alipour & Fischer, 2011; Fabbri, 2013) or arithmetical skills (Dehaene et al., 1993, see Cipora & Nuerk, 2013 for an overview). A stronger SNARC effect was found among participants with poor visuospatial abilities in relation with their less accurate representation of number magnitude (Viarouge, Hubbard & McCandliss, 2014). Among individual and/or group differences that tend to modulate the strength of spatial associations, it seems to us that inter-individual reaction time (i.e., latency) differences deserve a closer examination. Although the within-subject variability between our participants' fastest and slowest response times was sometimes considerable, it remained within the range reported in other studies. But nonetheless, inter-individual variability provides a more suitable frame to explain the strength of the SNARC effect than intra-individual ones. After having rank ordered participants as a function of their mean reaction times in each of the four conditions, we observed that the first third (fast participants) showed a smaller SNARC effect than the final third (slower participants), or even a reverse SNARC effect. Such a result suggests that the profile of participants based on their response initiation times might explain why, in other studies, some participants showed no SNARC effect. Beyond time differences caused by numerical format on magnitude activation and beyond response latency differences linked to effector type, individual profiles (at least partly) determine the strength or the emergence of the SNARC effect, with slower participants displaying a stronger SNARC effect. Furthermore, Viarouge et al. (2014) have shown a test–retest effect such that the strength of the SNARC effect was reduced by training, even when experimental sessions were separated by 14 days. This test–retest effect might be a consequence of the gradual shortening of response times (due to habituation) sometimes observed over trials. Indeed, if participants are faster over time, the SNARC effect should be weaker.

Overall, our study contributes to the identification of some factors modulating the strength of the SNARC effect by showing its actual time dependency. Time variations can result from processing differences linked to number format, effector type, individual promptness, task demands, etc. The optimal situation to obtain a strong SNARC includes (1) a number format allowing a quick activation of magnitude, (2) an effector associated with long enough response latencies and (3) a task requiring semantic processing. Besides these favorable conditions, individual characteristics may play an important role in the automatic space–number association. So eventually, the apparent lack of a SNARC effect does not necessarily means the lack of a space–number association; it may simply mean that it could not be reflected in response times. Finally, we think that our knowledge of the SNARC effect would take benefit from EEG investigations focusing on time-course aspects of the SNARC effect, allowing to separate the series of successive processing stages such as semantic access and motor preparation (Keus, Jenks & Schwarz, 2005).

Acknowledgements We warmly thank all reviewers for considering this paper. We thank Dr Christelle Lemoine-Lardennois and Dr Alexandra Fayel for their technical skills as well as all participants who volunteered for this study.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest. All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional research committee and with the 1964 Helsinki Declaration and its later amendments or comparable ethical standards. Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

References

Brysbaert, M. (2018) Numbers and language: What's new in the past 25 years?. In A. Henik & W. Fias (Eds.), *Heterogeneity of Function in Numerical Cognition*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.

Bulf, H., Cassia, V. M., & de Hevia, M. D. (2014). Are numbers, size and brightness equally efficient in orienting visual attention? Evidence from an eye-tracking study. *PLoS One, 9*(6), e99499. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099499.

Bulf, H., de Hevia, M. D., & Cassia, V. M. (2016). Small on the left, large on the right: Numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science, 19*(3), 394–401.

Bull, R., Cleland, A. A., & Mitchell, T. (2013). Sex differences in the spatial representation of number. *Journal of Experimental Psychology: General, 142*(1), 181.

Carling, K. (2000). Resistant outlier rules and the non-Gaussian case. *Computational Statistics & Data Analysis, 33*(3), 249–258.

Casarotti, M., Michielin, M., Zorzi, M., & Umiltà, C. (2007). Temporal order judgment reveals how number magnitude affects visuospatial attention. *Cognition, 102*(1), 101–117.

Cipora, K., & Nuerk, H. C. (2013). Is the SNARC effect related to the level of mathematics? No systematic relationship observed despite more power, more repetitions, and more direct assessment of arithmetic skill. *Quarterly journal of experimental psychology, 66*(10), 1974–1991.

Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review, 108*(1), 204.

Damian, M. F. (2004). Asymmetries in the processing of Arabic digits and number words. *Memory & Cognition, 32*(1), 164–171.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General, 122*(3), 371.

Fabbri, M. (2013). Finger counting habits and spatial-numerical association in horizontal and vertical orientations. *Journal of Cognition and Culture, 13*(1–2), 95–110.

Fattorini, E., Pinto, M., Rotondaro, F., & Doricchi, F. (2015). Perceiving numbers does not cause automatic shifts of spatial attention. *Cortex, 73*, 298–316.

Fias, W. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition, 2*(1), 95–110.

Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: Evidence from the SNARC effect. *Psychological Research Psychologische Forschung, 65*(4), 250–259.

Fischer, M. H. (2001). Number processing induces spatial performance biases. *Neurology, 57*(5), 822–826.

Fischer, M. H. (2008). Finger counting habits modulate spatial-numerical associations. *Cortex, 44*(4), 386–392.

Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience, 6*(6), 555–556.

Fischer, M. H., Shaki, S., & Cruise, A. (2009). It takes just one word to quash a SNARC. *Experimental Psychology, 56*(5), 361–366.

Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L., & Fias, W. (2004). Oculomotor bias induced by number perception. *Experimental Psychology, 51*(2), 91–97.

Fitousi, D., Shaki, S., & Algom, D. (2009). The role of parity, physical size, and magnitude in numerical cognition: The SNARC effect revisited.. *Perception & Psychophysics, 71*(1), 143–155.

Ford, N., & Reynolds, M. G. (2016). Do Arabic numerals activate magnitude automatically? Evidence from the psychological refractory period paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review, 23*(5), 1528–1533.

Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B., & Fias, W. (2006). Numbers and space: acomputational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 32*(1), 32.

Glaser, W. R. (1992). Picture naming. *Cognition, 42*(1), 61–105.

Hartmann, M., & Fischer, M. H. (2016). Exploring the numerical mind by eye-tracking: a special issue. *Psychological Research Psychologische Forschung, 80*, 325–333.

Hesse, P. N., Fiehler, K., & Bremmer, F. (2015). SNARC Effect in Different Effectors. *Perception, 45*(1–2), 180–195.

Hines, T. M. (1990). An odd effect: Lengthened reaction times for judgments about odd digits. *Memory & Cognition, 18*(1), 40–46.

Keus, I. M., Jenks, K. M., & Schwarz, W. (2005). Psychophysiological evidence that the SNARC effect has its functional locus in a response selection stage. *Cognitive Brain Research, 24*(1), 48–56.

Lindemann, O., Alipour, A., & Fischer, M. H. (2011). Finger counting habits in middle eastern and western individuals: an online survey. *Journal of Cross-Cultural Psychology, 42*(4), 566–578.

Loetscher, T., Bockisch, C. J., & Brugger, P. (2008). Looking for the answer: The mind's eye in number space. *Neuroscience, 151*(3), 725–729.

Loetscher, T., Bockisch, C. J., Nicholls, M. E., & Brugger, P. (2010). Eye position predicts what number you have in mind. *Current Biology, 20*(6), R264–R265.

Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology, 18*(2), R60–R62.

Macnamara, A., Keage, H. A., & Loetscher, T. (2018). Mapping of non-numerical domains on space: a systematic review and meta-analysis. *Experimental Brain Research, 236*, 335–346. https://doi.org/10.1007/s00221-017-5154-6.

Mock, J., Huber, S., Klein, E., & Moeller, K. (2016). Insights into numerical cognition: Considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research Psychologische Forschung, 80*(3), 334–359.

Myachykov, A., Cangelosi, A., Ellis, R., & Fischer, M. H. (2015). The oculomotor resonance effect in spatial–numerical mapping. *Acta-psychologica, 161*, 162–169.

Myachykov, A., Ellis, R., Cangelosi, A., & Fischer, M. H. (2016). Ocular drift along the mental number line. *Psychological Research Psychologische Forschung, 80*(3), 379–388.

Nuerk, H. C., Iversen, W., & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 57*(5), 835–863.

Nuerk, H. C., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The universal SNARC effect: The association between number magnitude and space is amodal. *Experimental Psychology, 52*(3), 187–194.

Roettger, T. B., & Domahs, F. (2015). Grammatical number elicits SNARC and MARC effects as a function of task demands. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 68*(6), 1231–1248.

Rugani, R., & de Hevia, M. D. (2017). Number-space associations without language: Evidence from preverbal human infants and non-human animal species. *Psychonomic Bulletin & Review, 24*(2), 352–369.

Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics, 66*(4), 651–664.

Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review, 16*(2), 328–331.

van Dijck, J. P., Abrahamse, E. L., Acar, F., Ketels, B., & Fias, W. (2014). A working memory account of the interaction between numbers and spatial attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 67*(8), 1500–1513.

Viarouge, A., Hubbard, E. M., & McCandliss, B. D. (2014). The cognitive mechanisms of the SNARC effect: An individual differences approach. *PLoS ONE, 9*(4), e95756. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095756.

Wood, G., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2006). Crossed Hands and the Snarc Effect: A failure to Replicate Dehaene, Bossini and Giraux (1993). *Cortex, 42*(8), 1069–1079.

Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: A meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science, 50*(4), 489–525.

Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: The SNARC effect and the reverse SNARC effect in English and Arabic monoliterates, biliterates, and illiterate Arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture, 5*(1), 165–190.

1.2 Poster 1 – Étude comparative en oculométrie de l'effet SNARC induit par des stimuli linguistiques numériques versus conceptuels

Pressigout A., Charvillat A., Fayel A., Vitkova V., & Doré-Mazars, K. (2016). Does conceptual quantity of words affect the spatial coding of saccade responses, like a SNARC effect? 39th ECVP European Conference on Visual Perception, 2016, August 28th- September 1st, Barcelona, Spain. [Poster]

Cette présente étude est à l'origine des questions de recherches qui se sont articulées autour du modèle ATOM (Walsh, 2003). Il faut noter que l'étude que présente ce poster a été réalisée en amont de celle présentée dans l'**Article 1**. L'association nombre-espace, initialement décrite par Dehaene et al. (1993) sous le nom d'effet SNARC, a été répliquée de nombreuses fois en réponse à la présentation de quantités numériques. La toute première question que nous nous sommes posée a été de savoir si des concepts non-numériques comme des mots faisant référence à des quantités sont également codés dans l'espace. Dans le domaine de la cognition incarnée, le lien entre le langage et l'espace a été largement étudié (Lachmair et al., 2014). En effet, les humains semblent se baser sur des cartographies spatiales pour se représenter et décrire les concepts qui vont influencer les réponses comportementales. Tout comme le traitement des nombres, le traitement des mots activerait donc des dimensions spatiales (Lachmair et al., 2014). Notre objectif était de tester la présence d'un effet SNARC sur les temps de réaction saccadiques, avec un matériel linguistique constitué de mots faisant référence à des petites ou grandeurs quantités conceptuelles (e.g. « idole » *vs*. « troupe ») dans une tâche de jugement de genre (féminin *vs*. masculin) et de le comparer à celui classiquement observé avec des quantités numériques (e.g. « deux » *vs*. « huit ») dans une tâche de jugement de parité. Malheureusement, les résultats des 23 participants n'ont pas permis de répliquer la présence d'un effet SNARC induit par des mots de chiffres, ni de montrer sa présence avec des mots faisant référence à une quantité conceptuelle. Néanmoins, les analyses complémentaires ont montré que sur les mots masculins uniquement, les latences étaient plus rapides à droite pour les mots faisant référence à une grande quantité (e.g. « peuple ») que pour ceux faisant référence à une petite quantité (e.g. « binôme »). Nous en avions conclu que l'absence d'effet SNARC global pouvait être due à des facteurs méthodologiques comme la tâche de jugement de genre ou le matériel linguistique qui sont susceptibles d'avoir annulé l'effet. Toujours est-il que l'absence d'effet SNARC sur les latences des saccades avec les mots de chiffres était inattendue. Bien qu'aucune expérience n'avait montré un tel effet sur les réponses saccadiques avec les mots de chiffres, plusieurs études l'avaient déjà observé sur des réponses manuelles (Dehaene et al., 1993; Fias, 2001; Nuerk et al., 2005; Roettger & Domahs, 2015). Les analyses individuelles ont mis en avant que l'effet SNARC était absent, voire inversé, chez 5 des 23 participants. Ces participants n'avaient pas été en contact avec une langue qui s'écrit ou se lit de droite à gauche, facteur culturel connu

pour annuler voire inverser l'effet SNARC (Shaki et al., 2009). L'hypothèse d'un effet plus prononcé sur les latences les plus élevées (Roettger & Domahs, 2015; Wood et al., 2008) n'a pas été confirmée dans nos résultats. En effet, aucune corrélation n'a été trouvée entre les latences moyennes individuelles et la taille de l'effet SNARC associé. Par conséquent, une seconde étude a pris forme afin d'examiner plus en détail l'impact de la variabilité des latences en comparant l'effet SNARC sur des réponses saccadiques et manuelles, induit par des chiffres arabes et des mots de chiffres. L'effet SNARC était attendu pour les deux formats de présentation sur les réponses manuelles. Nous avons fait l'hypothèse que sur les réponses saccadiques, qui sont plus rapides que les réponses manuelles, les associations spatio-numériques pourraient manquer de temps pour être reflétées, et ce d'autant plus avec des chiffres écrits en toutes lettres pour lesquels l'activation de la quantité prend plus de temps que pour les chiffres arabes (Fias, 2001). Ces résultats ont été confirmés (cf. **Article 1**), et nous ont permis de répliquer les résultats sur les mots de chiffres présentés par le **Poster 1**.

Time-dependency of the SNARC effect on number words: Evidence from saccadic responses

Alexandra Pressigout[1], Agnès Charvillat[1], Karima Mersad[1], Alexandra Fayel[1], Karine Doré-Mazars[1]

1 Laboratoire Vision Action Cognition EA 7326, Institut de Psychologie, INC, Université Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, Boulogne-Billancourt, France

What is the SNARC effect ?

Association between numbers and spatial responses was first reported by Dehaene, Bossini and Giraux (1993) in a bimanual parity judgment task. Participants were faster to respond with the left hand for small numbers and with the right hand for large numbers, regardless the parity. This effect was explicated by the hypothesis of a **mental number line**, describing the spatial mapping of numbers where the left is associated with small numbers and the right with large numbers. This effect is assumed to be automatic.

This association has abundantly been documented. **Dehaene et al. (1993) was cited more than 2000 times**) with **numerical quantity for Arabic numbers** in which studies track the SNARC with different effectors (e.g. manual, saccadic…), different kind of number presentation and different tasks demands.

Aim of the current study

A recent study revealed an effector specificity : the SNARC strength does not correlate between manual and saccadic responses (Hesse, Fiehler & Bremmer, 2015), which means that this association is modulated by task demands for number words but not for digits. **We tested the automaticity association of the SNARC effect for Arabic digits and number words based on saccadic responses.**

In a parity judgment task (even vs. odd), we tested for the first time the SNARC effect **with saccadic responses** comparing two conditions :

1. Arabic numbers : SNARC induced **by Arabic digits**
2. Number words: SNARC induced **by number words**

Methods

▶ Participants and apparatus

• 32 right-handed participants (9 ♀, 22±6 y.o.) with normal or corrected viewing, native French speakers
• Monocular recording of eye movement with an Eye Link 1000 SR Research®

▶ Instructions and Procedure:

• In both condition, participants had to look at the left target for even and at the right target for odd numbers words, and conversely (the order of blocks was counterbalanced)
• All participants performed the two conditions (order counterbalanced)
• Each word was presented 8 times in each condition

▶ Stimuli:

• Arabic numbers and number words were presented in white in uppercase (in Courrier New, size 11), in the center of the screen on a gray background
• Stimuli in both condition were number from zero to nine

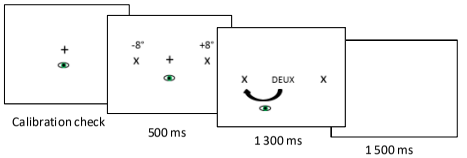

Figure 1. Time course of an experimental trial for number words condition

▶ Data analyses:

• Zero was excluded from analyses due to its unclear status of parity, five was then excluded to paired modalities of numbers

• Reaction times : sum of fixation and saccade times looking at the central word before the first saccadic response to the left or right side

• For each condition, we conducted a 4 (Magnitude: 1/2, 3/4, 6/7 *vs.* 8/9) X 2 (Parity : even *vs.* odd) X 2 (Saccade side : left *vs.* right) repeated measures ANOVA **on mean reaction times**, completed by Tukey's post hoc analyses.

• Mean error rates = 95.74±3.4% and 93.74±4.6% in the Arabic numbers and number words conditions, respectively

Results

• **In both condition : Main effect of Parity** : even numbers were responded faster than odd numbers, $F(1,28)=35.20$, $p<.001$. We found an interaction between **Parity and Magnitude**, $F(3,84)=17.09$, $p<.001$.

▶ Classical SNARC effect with Arabic numbers

• **Interaction Magnitude X Saccade side** was significant for Arabic numbers showing a SNARC effect, $F(3,84)=3.85$, $p=.01$.

• **Results were confirmed in regression analyses**. For each participant : we calculated the difference in reaction times dRT = the mean RTright minus the mean RTleft. Then, this difference was regressed on magnitude of number words. Negative slope indicates the presence of a SNARC effect . We then tested the mean of regression slope of each subject against 0.
For Arabic numbers, the mean slope (x=-4.03, *figure 2*) differed significantly from 0 indicating that **reaction times to the right was faster as the number words increased**, $t(31)=-2.64$, $p=.01$.

• The interaction Parity x Saccade side (MARC effect, Nuerk et al. 2004) was non significant for Arabic numbers.

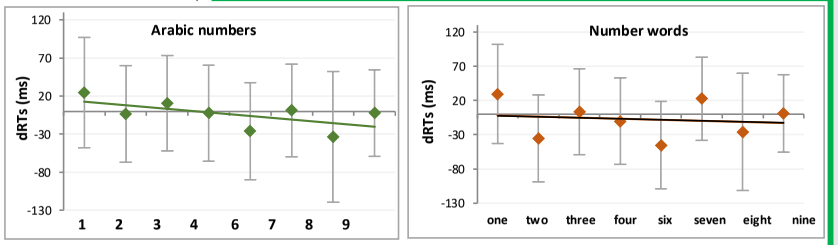

Figure 2. Mean regression describing the difference to go the right minus to go to the left for each number for Arabic numbers (left panel) and Number words (right panel) conditions

▶ Exploring the SNARC effect with number words

• The interaction Magnitude X Saccade side did not reach significance for number words. The mean slope (x=-1.36, *figure 2*) did not differ significantly from 0 (F<1), according to ANOVA analysis.

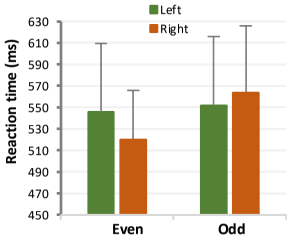

Figure 3. Gaze duration as a function of saccade side and parity for number words

◀ Interaction between **Parity X Saccade side** reflects a MARC effect ($F(1,28)=6.82$, $p=.01$, *figure 3*). Post-hoc analyses revealed that 1) even numbers are responded faster to the right than to the left ($p=.07$) and 2) responses are faster to the right for even numbers than for odd numbers ($p=.001$)

▶ Starting with the number words condition enhances the SNARC effect

• A triple interaction **Magnitude X Saccade side X Order of passation** was significant for number words ($F(3,84)=4.23$, $p<.01$), but not for Arabic numbers.
• The mean slope (*figure 4 to a representation of individuals slope*) of the group who starts with number words (x=-4.48) tendancielly differed from these of the second group (x=1.77, $p=.063$).

▼ Additionals analyses tried to find which differ from these two groups. Using an independant T-Test by group, we found that participants who starts with Arabic numbers condition did not increase their reaction time to pass to the Number words condition (*array below*, $t(30)=-2.32$, p=.027)

	RT Arabic numbers	RT Number words	dRT (Words – Arabic)
Arabic numbers first	557 ms	559 ms	2 ms
Number words first	489 ms	531 ms	42 ms
T-Test	p<.001	F<1	p<.05

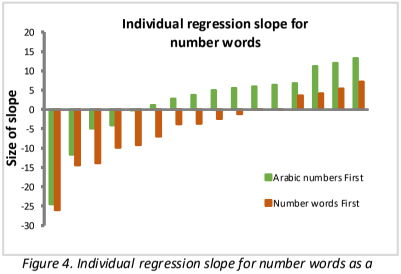

Figure 4. Individual regression slope for number words as a function of the order of condition passation. Negatives values indicate a SNARC effect.

Conclusions

▶ Individual differences in the SNARC effect

• In our sample, we have **found the classical SNARC effect induced by Arabic numbers based on saccadic responses**, which is in line with previous studies (Schwarz & Keus, 2004; Fischer & al., 2004).

• The classical SNARC effect seems harder to emerge when numbers are presented in words adding to saccadic responses which could come from a greater **individual variability.** However, only few studies have addressed the issue of individual differences in the SNARC effect (Wood et al., 2006, 2008).

• Additionals analyses reveal that the SNARC effect for number words is restricted to participants who starts the experiment with the number words condition, contrary to the other group who starts with the arabic numbers condition.

▶ Time-dependancy of the SNARC

• The SNARC effect is known to appear to be more pronounced **in late responses** (Wood et al. 2008; Roettger et al. 2015). Digits are responded faster than to the number words (Nuerk, 2005).We can make the hypothesis that participants who starts with the condition Arabic numbers, with training, do not increase their responses time in Number words condition. These fast responses may not active the association between space and time. This **time-dependency only impacts the lexical representation of numbers** (not their symbolic one).

• SNARC effect was found on manual responses wih number words (Nuerk, 2004) but based on saccadic latencies, it thus turns out to **be less automatic** than expected.

alexandra.pressigout@gmail.com

19th European Conference on Eye Movements, Wuppertal, Germany, 2017, August 20th – August 24th

1.3 Article 2 – Saccades toward a digit: does numerical magnitude modulate saccadic parameters?

Pressigout, A., & Dore-Mazars, K. (to be submitted). Saccades toward a digit: does numerical magnitude modulate saccadic paramters?

RESUME

Le traitement des chiffres est connu pour moduler le temps d'initiation des réponses motrices mais son impact sur les paramètres spatiaux des réponses motrices reste peu étudié. De façon intéressante, quelques études ont montré que le mouvement de saisie d'un objet était impacté par une information numérique, bien qu'elle ne soit pas pertinente pour effectuer le mouvement. Dans la présente étude, nous avons étudié la possibilité qu'un mouvement des yeux (i.e. saccade) vers un chiffre arabe visuel soit impacté par la magnitude numérique. Pour cela**,** 22 étudiants avaient pour tâche de réaliser des saccades oculaires vers un chiffre présenté seul ou accompagné d'un second chiffre constituant un distracteur proche afin d'induire un effet global. Les modèles de programmation saccadique prédisent que les positions d'arrivée des saccades, supposées atteindre une position intermédiaire entre la cible et le distracteur, seront déviées vers le stimulus le plus saillant (e.g. le plus large, le plus lumineux). Notre hypothèse était que la magnitude numérique est susceptible de moduler l'effet global, comme c'est le cas pour les propriétés physiques de taille et de luminance. Les participants avaient pour consigne d'effectuer une saccade vers le chiffre le plus éloigné (ou le chiffre seul) puis, une fois la saccade réalisée durant laquelle les stimuli étaient éteints, de juger si ce chiffre était plus petit ou plus grand que 5. Les chiffres variaient en magnitude numérique (1, 3, 7 ou 9) et en luminance (nombre de pixels : 96 ou 124 pour 1, 7 et 3, 9 respectivement). Lorsque les chiffres étaient présentés seuls, les résultats ont montré que l'amplitude était plus petite lorsque la saccade visait un chiffre de petite magnitude numérique. La présence d'un second chiffre a bien induit un effet global et les positions d'arrivée de la saccade étaient plus déviées vers le stimulus le plus lumineux uniquement lorsqu'il était également plus grand numériquement. Puisque ni la saillance numérique ni la saillance lumineuse seules n'ont permis de moduler l'effet global, cela suggère que la magnitude de ces deux propriétés doit être congruente pour le moduler. Pour conclure, la programmation saccadique semble sensible à l'information numérique véhiculée par des chiffres visuels.

Saccades toward a digit: does numerical magnitude modulate saccadic parameters?

Pressigout, A. & Dore-Mazars, K.

Université de Paris, VAC, F-92100 Boulogne-Billancourt, France

Alexandra Pressigout
Email address: alexandra.pressigout@parisdescartes.fr
Tel.: +33 (0)1 76 53 29 44

Abstract

Programming a movement requires an accurate estimation of magnitude information such as the size, the distance or the quantity characterizing objects of interest. Studies on grasping movements have shown that the mere presentation of a symbolic number influences kinematic parameters. Less is known about such an impact on eye movements. The present study explores whether number processing can modulate saccade programming by examining the amplitude of saccadic eye movements. We first investigated how aiming at a symbolic digit could affect saccadic parameters. The results show that the numerical information conveyed by visual stimuli induces variations in saccade amplitude: saccades tend to be shorter for smaller digits. This suggests that the processing of numerical and of saccade amplitude are based on a common scale. We then presented a second digit close to the target one. It is well known that saccadic landing position is deviated towards the most salient stimulus (e.g. the largest in terms of physical size or brightness) of visual configurations. Indeed, that condition induces a global effect, i.e. participants' eyes land at an intermediate position between the distractor and the target. Our data show that pairs with a distractor larger than the target in numerical magnitude and luminance reduce saccade amplitude compared to pairs with a distractor smaller in these dimensions. The fact that both luminance and numerical magnitude had no significant main effect suggests that these two factors modulate the global effect, provided that they are congruent in terms of magnitude. Overall, our results support the view that numerical and motor magnitudes are processed jointly.

Keywords: Numerical processing, saccadic eye movement, global effect, mental number line

Acknowledgements

We would like to thank the editor and reviewers for considering this manuscript. This research was funded by the French Ministry of Research and Higher Education (Alexandra Pressigout). Many thanks to Jerome Tagu for his proofreading and to Agnès Charvillat for her help with English.

Introduction

Because numerosity plays a critical role in everyday activities, the understanding of numerical processing is a major issue in cognitive research. Many studies have been carried out to understand how humans perceive and process numbers. It has been proposed that humans share an evolutionary and innate "sense of number" through which they are able to estimate numerosity (Brannon & Terrace, 2018; de Hevia, Izard, Coubart, Spelke, & Streri, 2014; Dehaene, 2010). This "sense of number" obeys the Weber-Fechner law stating that the smallest perceived difference increases with the value of the stimulus feature. Recent studies have challenged the innate character of this capacity, supporting the view of an ability to process continuous magnitudes preceding the ability to process numerosity (Leibovich, Katzin, Harel, & Henik, 2017). This "sense of magnitude" theory assumes that continuous dimensions share a common processing system for the perception of visual attributes (following Weber's law) and for action (Rinaldi & Girelli, 2017). An accurate estimation of numerosity, and more broadly of magnitude information, is specially important for the programming of movements. For instance, size and quantity information are required to grasp a handful of nuts. The idea that magnitude information directly impacts action has been developed in the AToM (A Theory of Magnitude) model proposed by Walsh (2003). AToM contends that numerical, temporal and spatial information are processed by a shared system for action located in the parietal cortex (Bueti & Walsh, 2009). The model also extends to other magnitudes that can be represented along a continuum such as physical size, luminance or sound intensity. Some behavioral studies have confirmed the predictions of a common system used for the representation of these dimensions and for the estimation of their magnitude. For instance, the perceived duration of a visual stimulus has been shown to increase with stimulus physical size, number of dots, luminance and numerical size (Xuan, Zhang, He, & Chen, 2007). Moreover, these dimensions have been found to interact with spatial dimensions (*SNARC effect:* Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993; *STEARC effect:* Ishihara, Keller, Rossetti, & Prinz, 2008; Wühr & Seegelke, 2018). Numerical size, physical size, luminance and conceptual size have been found to interact with space, as reflected by congruency effects between their relative magnitude and their spatial representation on manual reaction times (Ren, Nicholls, Ma, & Chen, 2011). Indeed, left and right spaces have been proved to be associated with stimuli respectively smaller and larger in number, size, intensity and conceptual size, inducing shorter reaction times. By and large, all these data support the notion of a common mental code for different magnitudes.

Although the perception of symbolic numbers shows common points with the perception of non-symbolic ones and with other physical magnitudes, it also exhibits specificities. Interestingly, a decrease or an increase in object size, number of dots or object luminance is physically perceptible and reflects a low-processing level while a change in number magnitude requires the access to the number concept, i.e. to a higher processing level (Gebuis & Reynvoet, 2012). Beyond the approximate number sense, the concept of exact numbers emerges later over the course of development and language

acquisition (Dehaene, 2010). The ability to understand symbolic numbers is critically important because it constitutes the basis for mathematical skills. Perceiving a symbolic number on a continuous mental magnitude scale requires recognizing it as numerical information and associating its nonverbal representation with its numerical symbol. Notwithstanding this functional idiosyncrasy, number perception seems to share neural codes with other perceptual magnitudes. For instance, numbers are closely linked with size, and estimating accurately size turns out to play a founding role regarding numerical processing (for a review see Henik, Gliksman, Kallai, & Leibovich, 2017).

In order to act on the environment, size provides important cues for sensori-motor transformation. Motor programming requires the integration of numerical, spatial and temporal information. Obviously, the size of an object is critical information for grasping movements. More surprisingly, two studies have shown that numbers in their symbolic form impact such movements, suggesting that symbolic magnitude information also interacts with action programming (Andres, Ostry, Nicol, & Paus, 2008; Lindemann, Abolafia, Girardi, & Bekkering, 2007). Objects on which large numbers were printed induced larger grip aperture during the early phase of reaching movements compared to those on which small numbers were printed (Andres, Ostry, et al., 2008). This suggests that both physical properties of stimuli and abstract semantic information affect grasping movements (for a review see Andres, Olivier, & Badets, 2008). Moreover, pointing movements have also been shown to interact with the processing of number and conceptual size (Dotan & Dehaene, 2013; Ganor-Stern & Goldman, 2015; Song & Nakayama, 2008). In these experiments, numbers modified the hand trajectory as a function of their magnitude. If such a numerical effect has been found in hand pointing, one can ask whether eye pointing is also impacted by numerical information. Indeed, pointing to an object has a similar goal, be it with one's hand or with one's gaze. It is however unclear whether numerical magnitude could also affect eye movements.

Saccades are rapid eye movements that bring the fovea, zone of highest visual acuity, on an object in the visual field. The aim of the present study is to investigate whether numerical information could also impact kinematic parameters of saccades. Some studies have reported an influence of number processing on the oculomotor system (for reviews see Hartmann, Grabherr, & Mast, 2012; Mock, Huber, Klein, & Moeller, 2016), reflected in its impact on saccade latencies during the stage of response selection (Fischer, Warlop, Hill, & Fias, 2004; Hesse, Fiehler, & Bremmer, 2016; Pressigout, Charvillat, Mersad, & Doré-Mazars, 2018; Schwarz & Keus, 2004). Regarding spatial parameters, number processing has been found to modulate saccade direction (Ruiz Fernández, Rahona, Hervás, Vázquez, & Ulrich, 2011; Salvaggio et al., 2018) but not saccade amplitude when participants are required to perform memory-guided saccades in response to a centrally presented number (Fischer et al., 2004).

Various studies have examined the influence of the properties of isolated targets on saccade amplitude. Regarding target size, studies have found inconsistent results. Findlay (1982) did not observe any effect of target size on saccade accuracy while Kowler and Blaser (1995) reported amplitude

variations (Kowler & Blaser, 1995; Van der Stigchel, Heeman, & Nijboer, 2012). Generally speaking, saccades are never perfectly accurate since they tend to be hypometric (i.e. eyes undershoot the target). Such hypometria linearly increases with target size (Ploner, Ostendorf, & Dick, 2004). Since the physical size of the saccade target is probably a critical dimension for motor programming, its numerical size may also be a critical dimension for it. One primary goal of the present experiment was to assess whether the numerical magnitude of saccade targets modulates the spatial parameters of saccadic eye movements. If numerical information were part of saccade programming, the numerical magnitude of target-digits should interfere with amplitude.

Moreover, various studies have found that the presence of a distractor close to a saccadic target deviates the endpoint of eye movements towards the distractor. This phenomenon called 'the global effect' (Findlay, 1982) is known to modify the spatial parameters of saccades without affecting their temporal parameters (for a review, see Vitu, 2008; Stefan Van der Stigchel & Nijboer, 2011 for reviews). The condition for inducing a global effect on saccade amplitude is to present the distractor in a window of 20° angular distance around the saccadic target (Walker, Deubel, Schneider, & Findlay, 1997). In such a case, the eyes land at the 'center of gravity' of the visual configuration (at an intermediate position between the target and the distractor), with no impact on saccade latency (Coren & Hoenig, 1972; Findlay, 1982). Outside this narrow window, saccade amplitude is unaffected, (i.e. the saccade lands on the target), but saccade latencies increase due to the presence of the distractor (i.e. the remote distractor effect, see Lévy-Schoen, 1969; L. E. Ross & Ross, 1980; S. M. Ross & Ross, 1981). The global effect on saccade amplitude has been investigated using several distractors, and manipulating their properties that traditionally reflect the relative saliency of the elements of visual scenes (Coren & Hoenig, 1972). Indeed, the most appropriate explanation for the global effect refers to the weight of activity of the target position in the salience map (Itti & Koch, 2000). During target selection, neurons coding different possible locations are activated on the salience map and compete in order to trigger one peak of activity. The latter will determine the coordinates of the saccadic vector. When the distractor and the target have the same weight in the saliency map, the peak of activity lies between the two elements, but visual properties of elements can modulate the peak of activity, bringing it closer to the most salient of them. For instance, the relative size of stimuli weighs the global effect. When two stimuli differing in size are presented at 5 and 10 degrees, saccade endpoint is deviated toward the biggest one (Findlay, 1982). The relative intensity of elements also modulates the global effect (Deubel, Wolf, & Hauske, 1984), deviating the saccade endpoint towards the brightest element. Therefore, these two dimensions (physical size and intensity) similarly impact the global effect, corroborating the idea of a common processing of magnitudes. Interestingly, beyond the influence of physical characteristic of stimuli, high level characteristics such as linguistic factors also impact the global effect. Beauvillain, Doré, and Baudouin (1996) have shown a luminance effect on words (i.e. eyes tend to land on the brightest letter in a word), but the use of unusual letters, involving orthographical irregularities, also impinges on saccade landing point (Beauvillain & Doré,

1998; Beauvillain et al., 1996). This suggests that abstract properties of elements in visual configurations can impact saccade programming and modulate the landing position. Therefore, the global effect seems to be an interesting phenomenon that could help to determine whether the saliency induced by a number impacts saccade amplitude. The second aim of this study was to test whether an abstract property of visual stimuli such as numerical information, could also modulate the global effect. To our knowledge, this is the first time that the global effect is investigated by varying the numerical information of stimuli in visual configurations.

In the present experiment, two Arabic digits (chosen among 1, 3, 7 or 9) were presented to the right side of a fixation cross at 5 and 8 degrees. Subjects' saccadic task was to move their gaze towards the target furthest from the fixation cross. Both digits were switched off during saccade execution. After the saccade, a magnitude comparison task (< or > 5) on the target-digit was performed in order to ensure that numerosity was correctly processed. The same procedure was used in the single target condition, in which the target appeared at 5 or 8 degrees, without distractor. If numerical information and saccadic parameters are both scaled on the magnitude system proposed by Walsh (2003), numerical magnitude should modulate saccade amplitude. In the absence of a distractor, we expect that making a saccade toward a digit will lead to variations in saccade amplitude, i.e. larger digits should increase saccade amplitude. In the condition with a distractor, one could expect a global effect on saccade amplitude driven by the relative numerical magnitude of the two stimuli of the visual configuration. In this case, the larger digit should be the most salient stimulus, and the saccade endpoint should be deviated toward it.

Method

Subjects

Twenty-two students from Paris Descartes University participated in the experiment (19 females, 20.9±3.2 y.o). All had normal or corrected vision and were naïve about the purpose of the experiment. They reported no history of neurological disorders and no familiarity with a right-to-left written language. Prior to the study, they gave informed consent to participate to the experiment in accordance with the Declaration of Helsinki. Procedures were approved by the local ethics committee of Paris Descartes University (N° CER-PD: 2018-62).

Apparatus and setup

Participants were seated in a dimly lit room at 57 cm in front of a 19 inches CRT iiyama screen (HM240DT), with a refresh rate of 144 Hz and a spatial resolution of 1024*768 pixels. Their head was maintained on a head restraint and rested on a chin rest to keep a 57 cm distance between their eyes and the screen. Viewing was binocular but only right eye movements were monitored by the EyeLink® 1000 (SR Research, Ontario CA) sampling at 1000 Hz and with a spatial resolution of

0.05°. The stimuli consisted of the Arabic digits 1, 3, 7 and 9 (h:18, w:13 px) and a fixation cross (h:12, w:12 px); all were presented in white on a grey screen (RGB: 128, 128, 128). Only odd digits were presented in order to avoid a potential parity effect (*Markdness Association of Responses Codes*, Nuerk, Iversen, & Willmes, 2004). Digits height and width were paired in order to avoid potential size influences (Findlay, 1982; Findlay, Brogan, & Wenban-Smith, 1993). Since stimulus intensity modulates the global effect (Deubel et al., 1984), digits were individually designed with PowerPoint® (Microsoft) so that the couples 1/7 and 3/9 were paired in number of pixels: 96 and 124 px respectively (1px = 1,5cd/m²). The difference in pixels was reduced as much as possible to avoid potential influences of stimulus intensity. The experiment was designed on Experiment Builder® (SR Research, Ontario CA).

Procedure

Each session started with a calibration procedure during which participants had to fixate a point successively presented at nine different locations on the screen. Each trial began with a fixation cross displayed for a random time between 150 and 350 milliseconds at a random position ranged from 1.8° to 5° to the left of the screen center. If the participant's gaze was detected outside of an invisible 2 x 2° window centered on the fixation cross, the trial was stopped and immediately re-ran. If not, one or two digits were displayed on the right of the fixation cross at 5 and/or 8°. Participants were asked to make a saccade toward the furthest (or the single) digit as fast as possible. The fixation cross and the digit(s) switched off once a saccade amplitude higher than 2° was detected. If no saccade was detected before 800 milliseconds, the trial was re-run later. Participants had to decide whether the furthest (or the single) digit was smaller or larger than five by pressing respectively the left or the right arrow key. The next trial started once the response was given.

The whole experiment included 8 single-target conditions (4 digits * 2 eccentricities) and 16 target-distractor conditions (4 digit-distractors * 4 digit-targets). All participants performed the experimental block of 288 trials (24 conditions repeated 12 times) preceded by a practice block (of 24 trials) in which each combination was presented once to familiarize the participant with the task and the digits.

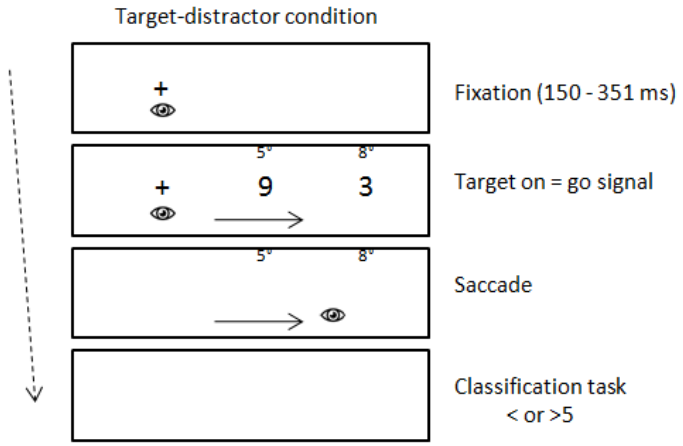

Figure 1. Task design in target-distractor conditions. Participants have to keep their gaze on the fixation cross. After a random delay (150-350ms), two digits appear on the right side of the fixation cross. Participants must perform a saccade toward the furthest digit and then decide whether this target is smaller or larger than 5 by pressing respectively the left or right arrow on a keyboard.

Analyses

Saccade latency (in milliseconds), defined as the time between the digit(s) appearance and the saccade onset, and saccade amplitude (in degrees) corresponding to the distance scanned by the first saccade after the digit(s) appearance were computed offline. For each participant, trials were discarded from the analysis when the first saccade (a) contained a blink (0.41%), (b) was performed in the wrong direction (0.12%), (c) was initiated too rapidly or too slowly (latencies below 80ms and above 400ms, 8.57%). Then, outliers were calculated using the Median Absolute Deviation method (Leys, Ley, Klein, Bernard, & Licata, 2013). Latencies higher or lower than 2.5 of the median absolute deviation were discarded (4.30%). For each eccentricity and each condition (single-target 5°, single-target 8° and target-distractor 8), extreme amplitude values were removed in the same way° (2.88%). Incorrect responses were also removed so as to restrict analysis to trials in which numerical magnitude had effectively been processed (2.36%). Discarded data represented 18% of the total number of trials by participant. For both latencies and amplitude, separate analyses were carried out to investigate numerical effects on single-target and target-distractor conditions.

Results

1. Single-target conditions

Eccentricity	**5°**				**8°**			
Digit	**1**	**3**	**7**	**9**	**1**	**3**	**7**	**9**
Latency (ms)	175 ±31	180 ±34	173 ±28	176 ±33	175 ±28	175 ±31	172 ±28	176 ±24
Amplitude °	4.751	4.808	4.773	4.782	7.356	7.484	7.524	7.423

Table 1. Means ± standard deviations of saccade latencies and amplitudes for each target digit (1, 3, 7 or 9) and each eccentricity (5 or 8°).

We first examined saccadic parameters as a function of numerical magnitude in single-target conditions, in which the digit was presented at 5 and 8° with no distractor (see Table 1). In this section, an ANOVA was conducted on saccade latencies with Eccentricity (5 *vs.* 8), Quantity (small *vs.* large) and Luminance (low *vs.* high) as within-subject factors. The "small" condition of Quantity collapsed digits 1 and 3, and the "large" condition collapsed digits 7 and 9. Since luminance is a critical factor for the analysis of target-distractor conditions, it was added in the current analysis for comparative purposes. Low luminance digits were 1 and 7 and highly luminance digits were 3 and 9.

In average, participants initiated their first saccade 175±26 milliseconds after the digit onset and their intra-variability was relatively small: the mean of individual standard deviation was 12±5 milliseconds. Neither main effect nor interaction was found on latencies (all $p>0.13$).

Since some studies have shown that listening to numbers deviated fixations on a cross toward the left or the side associated with their magnitude (Myachykov, Cangelosi, Ellis, & Fischer, 2015; Myachykov, Ellis, Cangelosi, & Fischer, 2016), we first examined whether the position of initial fixations varied as a function of numerical magnitude. No difference between conditions (Eccentricity * Quantity * Luminance) was found (all $p>0.30$) which discards the possibility of spatial biases during fixation. We conducted an ANOVA on saccade amplitude using the same design. The main effect of Eccentricity was significant [$F(1,21)=924.15$, $p<0.0001$]: mean saccade amplitude was 4.78 ±0.14° when the target was presented at 5° and was 7.45 ±0.11° in the 8° condition. Although relatively accurate, saccades were slightly hypometric (4.6% at 5° and 6.9% at 8° of the target eccentricity) which is congruent with the 10% hypometria generally reported in the literature (Becker, 1989). No main effect of Quantity or Luminance was found (all $p>0.14$) but their interaction was significant [$F(1,21)=9.50$, $p=0.006$]. Tukey's post-hoc revealed that the mean saccade amplitude for digit 1 (small quantity / low luminance, 6.054 ±0.11°) significantly differed from digit 3 (small quantity / high luminance, 6.146 ±0.12°, $p=0.03$) and from digit 7 (large quantity / small luminance, 6.148 ±0.12°, $p=0.03$). Regardless of eccentricity, saccade amplitude was shorter for the smallest digit, which supports the ATOM model (Walsh, 2003). Surprisingly, saccade amplitude tended to decrease for digit 9 (6.106 ±0.13°), which cannot be due to luminance, as digit 9 was brighter.

2. Global effect

Before investigating how numerical magnitude influences saccade amplitude, we assessed whether participants exhibited a global effect. We therefore conducted an ANOVA on saccade amplitude with Condition (single 5°, single 8°, distractor 8°) as a within subject factor. As expected, the main effect of amplitude was significant [$F(2,42)=427$, $p<0.001$] and Tukey's post-hoc test revealed that each condition differed from others (all $p<0.001$, see Figure 2 for distributions).

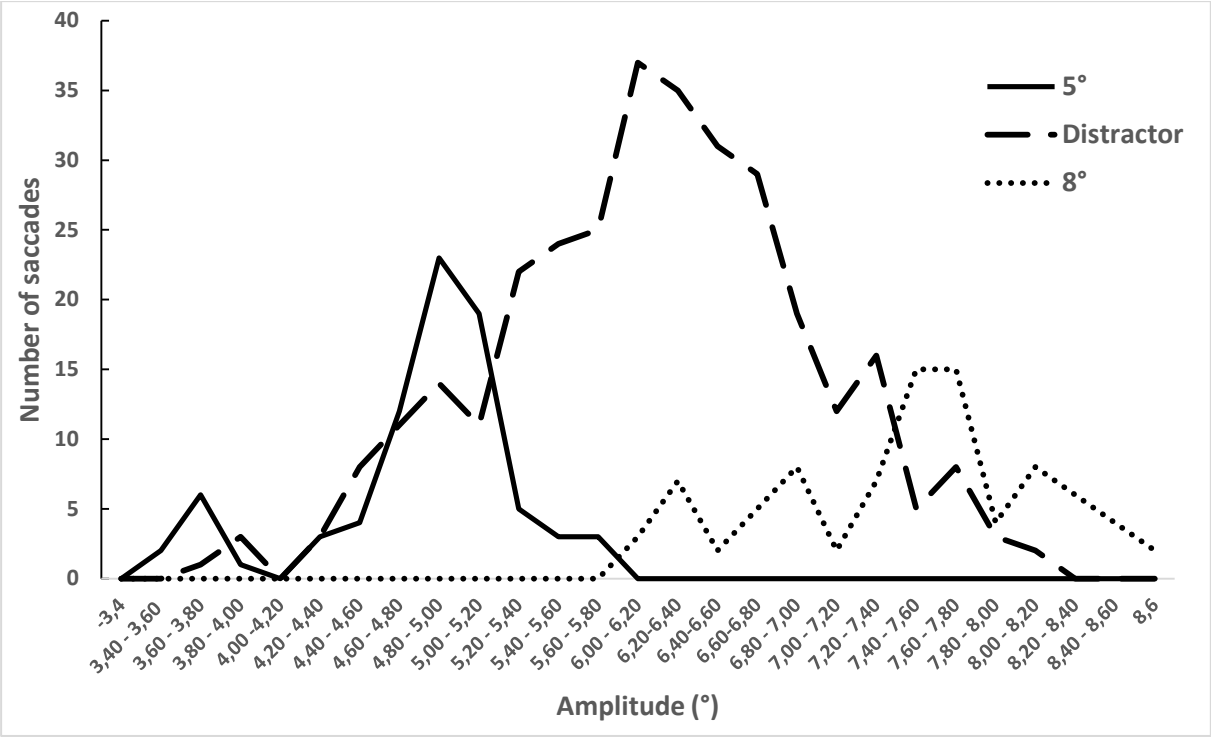

Figure 2. Distribution of individual mean saccade amplitudes in the different conditions (single target at 5°, single target at 8°, and distractor-target at 8°). Each bin represents a 0.20° range.

For each participant, we calculated their GEP (global effect percentage, see Findlay, Brogan, & Wenban-Smith, 1993; McSorley & Findlay, 2003) using the following formula : GEP = 100*([A_{td} – $A_{5°}$]/[$A_{8°}$ – $A_{5°}$]), where A_{td} is the mean saccade amplitude in target-distractor conditions and $A_{5° \text{ or } 8°}$ is the mean saccade amplitude in single-target conditions for each eccentricity. A GEP of 0% indicates that saccades landed on the distractor which denotes a strong global effect while a GEP of 100% indicates that they landed on the target, which denotes an absence of global effect. In our sample, GEP values ranged from 15 to 70% (mean =47.55 ±15%) meaning that all participants exhibited a global effect. Note that the data follow a normal distribution (Shapiro-Wilk, W=0.96, p=0.53) Although the global effect is generally prominent for saccades with a short latency (Coëffé & O'regan, 1987; Findlay, 1982), the correlation between individual mean latencies and the GEP was not significant (r=-0.03 p>0.05), which may be due to the small inter-individual variations in latencies. Importantly for our purpose, the mean saccade latency of 176 milliseconds did not differ between conditions (F<1). Therefore, the distractor effect on saccade latencies, which is not the main interest of the experiment, would not be developed in the future analyses.

3. Target-distractor conditions

The following analyses investigated whether numerical magnitude could be a salient property modulating the global effect. As in single-target condition analyses, the position of initial fixations did not differ between conditions (p>.09). Since luminance is a factor known to impact the global effect,

we grouped the different possible combinations depending on whether the distractor (D) was numerically larger/smaller/equal or brighter/less bright/equally bright than the target (T) (see Table 2).

Luminance / Magnitude	**D < T**	**D = T**	**D > T**
D < T	1-9 / 1-3 / 7-9	1-7 / 3-9	3-7
D = T		1-1 / 3-3 / 7-7 / 9-9	
D > T	7-3	7-1 / 9-3	9-1 / 3-1 / 9-7

Table 2. Pairs of digits presented during the experiment. For each pair, the first digit is the distractor presented at 5° to the right from the fixation cross and the second digit is the target presented at 8° to the right from the fixation cross. 'D' represents the distractor, 'T' the target, the operators ('<', '>' or '=') their relation either in luminance or in magnitude.

As shown in Table 2, in three (out of six) combinations in which the distractor is numerically larger, it is also brighter than the target. Conversely, in three (out of six) combinations for which the distractor is numerically smaller, the latter is also less bright than the target. To avoid confusion between magnitude and luminance, we limited the comparison between pairs. Since the luminance of elements in a configuration (Deubel et al., 1984) and the global size of the configuration (S. Van der Stigchel et al., 2012) has been shown to modulate the global effect, the between-pair luminance (i.e. difference in luminance between pairs) constituted an additional factor which comes on top of the within-pair factor (i.e. the difference in luminance between digits within a pair).

Magnitude and between-pair luminance effects

	Small magnitude	**Large magnitude**
Low between-pair luminance	Pair : 1-1 Amp : 5.60 ±0.84°	Pair : 7-7 Amp : 6.00±0.80°
High between-pair luminance	Pair : 3-3 Amp : 6.17±0.90°	Pair : 9-9 Amp : 6.04±0.91°

Table 3. Mean saccade amplitude in degrees and standard deviation as a function of type of pairs of identical digits: pairs for which digits are equal in terms of numerical magnitude and luminance, and pairs differing in term of quantity (small vs. large) and of between-pair luminance (low vs. high).

First, pairs in which the distractor and the target are equal both numerically and in luminance were tested. These four pairs differ in Quantity (small vs. large) and in Between-pair Luminance (low vs. high). Since the distractor and the target have the same weight in term of numerical or physical saliency, amplitudes were not expected to vary in these conditions. An ANOVA was run with these

two within-subject factors on amplitudes. The main effect of between-pair luminance was close to significance [$F(1,21)=4.15$, $p=0.054$], indicating that amplitude tends to be longer for brighter pairs. The main effect of Quantity was not significant [$F(1,21)=2.35$, $p=0.144$] and did not interact with Luminance ($F<1$). The effect of Luminance seems essentially due to larger amplitudes for the 3-3 pair (6.174°) than for the other ones (see table 3). More importantly for our purpose, saccade amplitude did not vary with quantity, suggesting that the same perceptual weight has been attributed for each numerically equal digit.

Numerical effects for within pair isoluminant digits

	Magnitude D < T	**Magnitude D > T**
Low between-pair luminance	Pair : 1-7 Amp : 6.06 ±0.82°	Pair : 7-1 Amp : 6.03 ±0.83°
High between-pair luminance	Pair : 3-9 Amp : 6.16 ±0.78°	Pair : 9-3 Amp : 6.03 ±0.88°

Table 4. Mean saccade amplitude in degrees and standard deviation as a function of type of pairs of different digits: Pairs of isoluminant digits varying in numerical magnitude and between-pair luminance (low vs. high). See Table 3 for abbreviations.

In order to investigate separately the effect of numerical magnitude, the four pairs of isoluminant digits presented in table 4 have been compared (the distractor and the target have the same luminance). The effect of between-pair luminance being unclear (see section above), an ANOVA on saccade amplitude was run with **Numerical Magnitude** (D < T vs. D > T) and **Between-pair Luminance** (low vs. high) as within-subject factors. Neither the main effect of the two factors nor their interaction was significant (all $p>0.26$). The luminance factor was then removed from the analysis, and the effect of numerical magnitude was tested using a Student's T-test. The analysis revealed no difference between pairs with a higher (6.033° ±0.84) and those with a lower magnitude distractor (6.111° ±0.78), ($t(22)=1.01$, $p=0.32$)). Saccade amplitude did not differ depending on the numerical size relationship (smaller/larger) between the target and the distractor inside a pair.

Magnitude and luminance concomitant effects

Magnitude & Luminance **D < T**	**Magnitude & Luminance** **D > T**
Pairs : 1-9 / 1-3 / 7-9 Amp : 6.16 ±0.87°	Pairs : 9-1 / 3-1 / 9-7 Amp : 6.00 ±0.78°

Table 5. Mean saccade amplitude in degrees and standard deviation as a function of distractor-target (D-T) configuration: distractor numerically larger and brighter ("D>T") versus distractor numerically smaller and less bright ("D<T").

A final analysis tested whether pairs including a distractor both higher (or lower) in numerosity and luminously impacted saccade amplitude. In principle, such pairs are optimal configurations to generate effects on saccade amplitude. If both magnitudes impact saccade deviation (i.e. its amplitude) in the same way, the latter should be larger when the distractor is more salient both in numerosity and in luminance. We performed a t-test to compare the pairs in which the distractor is either inferior or superior to the target both in numerical magnitude and luminance (see Table 5 for combinations in each condition). The data show that saccade amplitude defers significantly depending on whether the distractor is more (6.16 ±0.87°) or less (6.00 ±0.78°, Δ=0.154°) salient ($t(22)=3.59$, $p=0.002$). As can be seen in Figure 3, saccades tend to be more deviated toward the left of the distribution, i.e. the distractor) in the "D>T" condition in which the distractor is both higher in numerosity and luminance than in the opposite condition ("D<T").

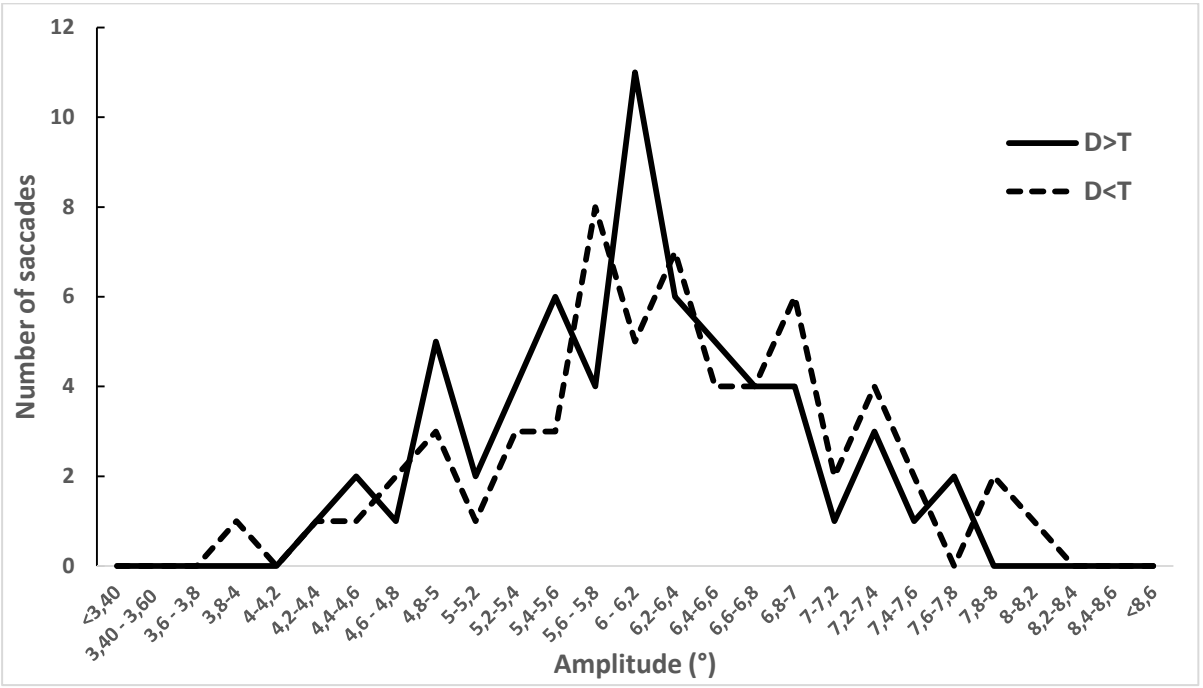

Figure 3. Distribution of individual mean saccade amplitudes for pairs in which the distractor is both higher ("D>T") or both smaller ("D<T") in numerosity and luminance. Each bin represents a 0.20° range.

Discussion

The aim of the present study was to test whether the numerical magnitude of a target influenced saccade amplitude in single-target and distractor-target conditions. We first investigated the effect of targeting a single symbolic digit (1, 3, 7 or 9), then we studied the impact of adding a digit-distractor on saccade programming. In the latter case, participants were required to make a saccade toward the

digit furthest from the fixation point. After the saccade, participants had to compare the numerical target with the standard 5. The small number of incorrect responses indicated that the numerical target had been successfully processed.

Single-target conditions

In single-target conditions, saccade amplitude was smaller for digit 1 than for digits 3 and 7. Digits 1 and 7 being isoluminant, this difference in amplitude cannot be due to luminance. As no other visual property differentiated the two digits, this finding suggests that saccade programming is sensitive to semantic information, which confirms previous results on grasping (Andres et al., 2008; Lindemann et al., 2007). Besides, results showed that increasing numerical magnitude tends to increase saccade amplitude. Therefore, this result is congruent with the assumption of ATOM according to which numbers are interpreted as distances from an origin (Winter, Matlock, Shaki, & Fischer, 2015). For left-to-right writers and readers, the origin is situated on the left, and numbers are located according to their relative magnitude on a left-to-right mental number line (Dehaene et al., 1993; Shaki et al., 2009). As in our experiment digits were presented at the target location, one may assume that the standard digit is represented at the target location rather than at the fixation point. We presumed that digit 1 induced a spatial bias resulting in a subjective shift of the numerical target toward the left, and thus in decreasing saccade amplitude. Remind that saccades were only executed toward the right side. Following this logic, digit 9 should have induced a spatial bias toward the right and an increase in saccade amplitude, but our data do not support this deduction. Another possibility is that the shorter saccades in response to digit 9 may be due to the distance effect (Moyer & Landauer, 1967), i.e., the fact that the time required to compare two digits varies inversely with their numerical distance. Initially described on reaction times, the numerical distance between a digit-stimulus and a numerical standard has been shown to modulate saccade amplitude (Pressigout & Dore-Mazars, under review) and manual trajectories (Chagas, Dotan, Piazza, & Dehaene, 2017; Dotan & Dehaene, 2013; Song & Nakayama, 2008). For instance, when participants performed a saccade in response to a number classification task, saccade amplitude was positively related with the relative proximity of target digits to the standard (Pressigout & Dore-Mazars, under review). However, the question arises whether in the present study, the number classification task (performed at the end of each trial) influenced the oculomotor behavior impacting saccade amplitude. If the numerical standard is represented at the target localization, digits 1 and 9 should elicit smaller saccades than digits 3 and 7, closer to the standard 5. In sum, our assumption is that the distance effect may have counterbalanced the numerical magnitude effect (larger saccades in response to larger numbers) expected for digit 9. Moreover, the distance effect has strengthened the numerical magnitude effect (smaller saccades in response to small numbers) expected for digit 1. Overall, the numerical information conveyed by the saccade target has been processed by the oculomotor system, although this information was not relevant to perform the task.

Regarding saccade latencies, they were not modulated by digit magnitude. Given that numbers are spatially encoded with small numbers associated to the left space and large numbers to the right (i.e. SNARC effect, Dehaene et al., 1993), targeting a large number to the right should have induced shorter saccade latencies than targeting a small number to the right. However, the absence of such an effect suggests that latencies were stable across conditions, and were not modulated by numerical information, which could be due to the fixed saccade direction (always to the right). Indeed, the SNARC effect is typically observed with protocols requiring lateralized responses, and results in faster responses for conditions in which response direction matches with number magnitude (i.e. left/small & right/large) and slower responses for incongruent conditions (i.e. right/small & left/large), as explained by the dual-route model (Gevers, Verguts, Reynvoet, Caessens, & Fias, 2006). Although spatial-numerical associations are supposed to be automatic (Dehaene et al., 1993), they could be either masked or suppressed when response direction remains constant.

Distractor-target conditions

Our second major objective was to test whether available numerical information was a salient property for the oculomotor system, likely to modulate the global effect usually found on saccade accuracy (Van der Stigchel & Nijboer, 2011). First, the global effect was similar for pairs numerically equal whatever their numerical magnitude, which is consistent with the idea that identical stimuli have the same weight in the salience map (Findlay & Walker, 1999; Itti & Koch, 2000). To identify the factor(s) influencing the amplitude of saccades toward a target digit displayed at the same time as a distractor, we then compared critical pairs (i.e. those involving a luminance and a numerosity disparity). Results revealed no main effects of either luminance or number. Given the modulating role of stimulus intensity on the global effect (Deubel et al., 1984), the luminance of each digit had been designed so that the intensity differences were very small; for this reason, an influence of this factor cannot be totally ruled out. But interestingly, when the distractor in less salient in term of both numerical and luminance magnitude than the more eccentric digit target, saccades were longer than when the distractor is more salient in both magnitudes. This means that the single effect of intensity or of numerical magnitude of the distractor is not sufficient to modulate the global effect; to do so, these two factors have to be congruent in magnitude (i.e. brighter/numerically larger or less bright/numerically smaller). According to the "average weighted explanation", the peak of activity in the saccade map which codes saccade landing points is determined by the weight of each element. In the salience map (Coren & Hoenig, 1972), our hypothesis would be that the brighter or the numerically larger element of the visual configuration was insufficiently salient to bring the peak of activity closer to it. However, if the distractor is both brighter and numerically larger, the peak of activity becomes closer to it and eyes tend to be more attracted by it. Numerical magnitude may have weighted the global effect when the effect was associated with the luminance, providing additional evidence in favor of the role of number in action (Andres et al., 2008; Rinaldi & Girelli, 2017; Rugani

& Sartori, 2016). These results support the ATOM theory (Walsh, 2003) and the close link between luminance and numerical magnitude that can be processed along the same scale. Indeed, several studies have reported similar processing for these two magnitudes (Ren et al., 2011; Xuan et al., 2007). Unlike physical and numerical size, luminance and number are not frequently directly tested for congruency effects. Indeed, the physical size of a number automatically interacts with its numerical dimension; for instance, when participants have to decide whether a number is smaller or larger than 5, reaction times are faster when its numerical magnitude is congruent with its actual size (Cohen Kadosh et al., 2007; Henik & Tzelgov, 1982). Given that these dimensions (size, luminance and number) share a common processing, luminance and number magnitudes can possibly lead to congruency conditions modulating saccades (i.e. smaller distractor in number and luminance inducing smaller amplitudes, and vice versa).

In both conditions, the coding of numerical information was very fast since latencies fell within a narrow range (175ms in single-target condition and 176ms in distractor-target condition). However, response initiation time is a key factor to detect an impact of numerical magnitude. Long latencies have been found to correlate with the strength of the SNARC effect (Wood et al., 2008). Indeed, it is known that spatial-numerical associations are critically time-dependent (Didino, Breil, & Knops, 2019; Fischer, Castel, Dodd, & Pratt, 2003; Pressigout et al., 2018; Wood et al., 2008). For example, saccades have been found to elicit smaller spatial-numerical effects due to their short initiation time compared to manual responses. Moreover, participants whose saccades tend to be slow are more likely to exhibit a SNARC effect compared to those who make rapid ones (Pressigout et al., 2018). These studies suggest that numerical effects need time to be reflected in the temporal parameters of action, and might explain why the single-target condition did not produce any spatial-numerical effect on latencies. However, less is known about the time-course of numerical effects on spatial parameters, although some studies showed an early impact of number on hand trajectories (Song & Nakayama, 2008) or grasping (Lindemann et al., 2007). In addition, when participants are asked to keep their eyes on a fixation cross, number magnitude has been found to deviate the gaze 450 milliseconds after the number auditory onset (Myachykov et al., 2016; experiment 2). One could assume that increasing saccade latencies in our experiment should have accentuated the numerical effect we found. Nevertheless, long latencies have also been found to weaken the global effect (Coëffé & O'regan, 1987; Findlay, 1982). When participants are asked to generate saccades as rapidly as possible or as accurately as possible, saccades with latencies higher than 300 milliseconds show a weaker global effect than those with shorter latencies (Ottes, Gisbergen, & Eggermont, 1984). This was however not the case in our experiment, as the correlation between individual saccade latencies and individual global effects was close to zero. To sum up, the time required to produce a numerical effect and the time require to produce a global effect seem to be in competition, so that delaying saccades would concurrently mask the global effect.

It is important to note that the presence of a visual saccadic target should make it harder to observe an effect of abstract properties of targets on saccade amplitude. Indeed, although saccades are usually found to be hypometric, they are quite accurate, especially those below 10° (Becker, 1989; Frost & Pöppel, 1976). As a result, their amplitude varies little. One possibility to increase the variability in saccade amplitude is to induce memory-guided saccades or to switch off the target during the saccade (Vergilino & Beauvillain, 2001). Fischer et al. (2004) have investigated the spatial-numerical associations on saccade amplitude using memory-guided saccades but they did not report any effect, although saccades in response to extreme numbers (here, 1 and 9) tended to be longer than saccades in response to intermediate ones ($p<0.08$). In our experiment, digits were switched off as soon as a saccade was detected, but it may not have been sufficient to increase amplitude variations. Moreover, target eccentricity in the present experiment as in Fischer et al., 2004's one, is inferior to 10° (5°/8° and 9.2° respectively). One possibility would be to increase target eccentricity and consider the numerical effect on saccade amplitudes. Recently, Fischer et al. have cleverly investigated spontaneous swiping movements in the absence of any target. They asked participants to move an object with their forefinger on a touchscreen either to the left or to the right side of an empty screen as a function of the numerical magnitude of and the parity of numbers. They found that swiping movements were longer in response to larger numbers. Similar results were found for saccade amplitude following a numerical distance effect (Pressigout & Dore-Mazars, under review): saccades were longer for digits numerically far from the standard, which corroborates the tendency found by Fischer et al. (2004). These results suggest that the absence of saccade coordinates imposed by the experimental protocol fosters the emergence of numerical effects. In the presence of a saccadic target, the expected numerical shift may not be reflected by the spatial parameter of movement.

Conclusion

The aim of this study was to use the global effect paradigm in order to highlight numerical effects on saccade metrics. Our results do show that when the saccadic system aims at a symbolic digit, saccade programming is sensitive to its numerical magnitude information. It supports the ATOM hypothesis whereby the processing of some dimensions such as numerical size, physical size or luminance interferes on saccade amplitude in similar ways. These findings add to the growing evidence that saccade metrics offer a valuable source of information to study the close link between numerical cognition and action. The impact of numbers on the spatial parameters of saccades confirms that motor programming relies on numerosity information for movement programming. More broadly, these arguments support the notion of shared metrics for action and perception and raise the question of the bidirectional influences in the perception-action loop. If perceptual dimensions and motor parameters are actually calibrated on a common scale, modifying motor parameters should logically interfere with the perception of number, space or time magnitudes.

References

Andres, M., Olivier, E., & Badets, A. (2008). Actions, Words, and Numbers. *Current Directions in Psychological Science*, *17*(5), 313–317. https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2008.00597.x

Andres, M., Ostry, D. J., Nicol, F., & Paus, T. (2008). Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, *44*(4), 414–419. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.007

Beauvillain, C., & Doré, K. (1998). Orthographic codes are used in integrating information from the parafovea by the saccadic computation system. *Vision Research*, *38*(1), 115–123. https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00127-2

Beauvillain, C., Doré, K., & Baudouin, V. (1996). The "center of gravity" of words: Evidence for an effect of the word-initial letters. *Vision Research*, *36*(4), 589–603. https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00141-7

Becker, W. (1989). The neurobiology of saccadic eye movements. Metrics. In *Reviews of oculomotor research* (Vol. 3, p. 13).

Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (2018). The Cognitive Animal. *The Cognitive Animal*, 1–14. https://doi.org/10.7551/mitpress/1885.001.0001

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

Chagas, P. P., Dotan, D., Piazza, M., & Dehaene, S. (2017). Finger Tracking Reveals the Covert Stages of Mental Arithmetic. *Open Mind : Discoveries in Cognitive Science*, *1*(1), 30–41. https://doi.org/10.1162/opmi

Coëffé, C., & O'regan, J. K. (1987). Reducing the influence of non-target stimuli on saccade accuracy: Predictability and latency effects. *Vision Research*, *27*(2), 227–240. https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90185-4

Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Linden, D. D. E. J., 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

Coren, S., & Hoenig, P. (1972). Effect of Non-Target Stimuli upon Length of Voluntary Saccades. *Perceptual and Motor Skills*, *34*(2), 499–508. https://doi.org/10.2466/pms.1972.34.2.499

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. (2010). *La bosse des maths: quinze ans après.* (Odile Jaco).

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology. General*, *122*(3), 371–396. https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371

Deubel, H., Wolf, W., & Hauske, G. (1984). The Evaluation of the Oculomotor Error Signal. In *Advances in Psychology* (Vol. 22, pp. 55–62). https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61818-X

Didino, D., Breil, C., & Knops, A. (2019). The influence of semantic processing and response latency on the SNARC effect. *Acta Psychologica*, *196*(April), 75–86. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.04.008

Dotan, D., & Dehaene, S. (2013). How do we convert a number into a finger trajectory? *Cognition*, *129*(3), 512–529. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.07.007

Findlay, J. M. (1982). Global visual processing for saccadic eye movements. *Vision Research*, *22*(8), 1033–1045. https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90040-2

Findlay, J. M., Brogan, D., & Wenban-Smith, M. G. (1993). The spatial signal for saccadic eye movements emphasizes visual boundaries. *Perception & Psychophysics*, *53*(6), 633–641. https://doi.org/10.3758/BF03211739

Findlay, J. M., & Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(4), 661–674. https://doi.org/10.1017/S0140525X99002150

Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, *6*(6), 555–556. https://doi.org/10.1038/nn1066

Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L., & Fias, W. (2004). Oculomotor Bias Induced by Number Perception. *Experimental Psychology (Formerly "Zeitschrift Für Experimentelle Psychologie")*, *51*(2), 91–97. https://doi.org/10.1027/1618-3169.51.2.91

Frost, D., & Pöppel, E. (1976). Different programming modes of human saccadic eye movements as a function of stimulus eccentricity: Indications of a functional subdivision of the visual field. *Biological Cybernetics*, *23*(1), 39–48. https://doi.org/10.1007/BF00344150

Ganor-Stern, D., & Goldman, R. (2015). Reaching towards an end: Numerical end and distance effects in motor movements. *Journal of Cognitive Psychology*, *27*(4), 490−498. https://doi.org/10.1080/20445911.2014.950662

Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2012). The interplay between nonsymbolic number and its continuous visual properties. *Journal of Experimental Psychology: General*, *141*(4), 642–648. https://doi.org/10.1037/a0026218

Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B., & Fias, W. (2006). Numbers and space: A computational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(1), 32–44. https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.1.32

Hartmann, M., Grabherr, L., & Mast, F. W. (2012). Moving along the mental number line: Interactions between whole-body motion and numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*(6), 1416–1427. https://doi.org/10.1037/a0026706

Henik, A., Gliksman, Y., Kallai, A., & Leibovich, T. (2017). Size Perception and the Foundation of Numerical Processing. *Current Directions in Psychological Science*, *26*(1), 45–51. https://doi.org/10.1177/0963721416671323

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

Hesse, P. N., Fiehler, K., & Bremmer, F. (2016). SNARC Effect in Different Effectors. *Perception*, *45*(1–2), 180–195. https://doi.org/10.1177/0301006615614453

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

Itti, L., & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research*, *40*(10–12), 1489–1506.

Kowler, E., & Blaser, E. (1995). The accuracy and precision of saccades to small and large targets. *Vision Research*, *35*(12), 1741–1754. https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)00255-K

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

Lévy-Schoen, A. (1969). Détermination et latence de la réponse oculomotrice à deux stimulus simultanés ou successifs selon leur excentricité relative. *L'année Psychologique*, *69*(2), 373–392. https://doi.org/10.3406/psy.1969.27671

Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, *49*(4), 764–766. https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013

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), 1400–1409. https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1400

McSorley, E., & Findlay, J. M. (2003). Saccade target selection in visual search: Accuracy improves when more distractors are present. *Journal of Vision*, *3*(11), 20. https://doi.org/10.1167/3.11.20

Mock, J., Huber, S., Klein, E., & Moeller, K. (2016). Insights into numerical cognition: considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research*, *80*(3), 334–359. https://doi.org/10.1007/s00426-015-0739-9

Moyer, R. S., & Landauer, T. . (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*.

Myachykov, A., Cangelosi, A., Ellis, R., & Fischer, M. H. (2015). The oculomotor resonance effect in spatial-numerical mapping. *Acta Psychologica*, *161*, 162–169. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.09.006

Myachykov, A., Ellis, R., Cangelosi, A., & Fischer, M. H. (2016). Ocular drift along the mental

number line. *Psychological Research*, *80*(3), 379–388. https://doi.org/10.1007/s00426-015-0731-4

Nuerk, H., Iversen, W., & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *57*(5), 835–863. https://doi.org/10.1080/02724980343000512

Ottes, F. P., Gisbergen, J. A. M., & Eggermont, J. J. (1984). Metrics of saccade responses to visual double stimuli: two different modes. *Vision Research*, *24*.

Ploner, C. J., Ostendorf, F., & Dick, S. (2004). Target Size Modulates Saccadic Eye Movements in Humans. *Behavioral Neuroscience*, *118*(1), 237–242. https://doi.org/10.1037/0735-7044.118.1.237

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., & Doré-Mazars, K. (2018). Time dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. *Psychological Research*, *0*(0), 1–11. https://doi.org/10.1007/s00426-018-1010-y

Ren, P., Nicholls, M. E. R., Ma, Y. ye, & Chen, L. (2011). Size matters: Non-Numerical magnitude affects the spatial coding of response. *PLoS ONE*, *6*(8), 4–9. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023553

Rinaldi, L., & Girelli, L. (2017). Commentary: From "sense of number" to "sense of magnitude" - The role of continuous magnitudes in numerical cognition. *Frontiers in Psychology*, *8*(MAY), 1–3. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00652

Ross, L. E., & Ross, S. M. (1980). Saccade latency and warning signals: Stimulus onset, offset, and change as warning events. *Perception & Psychophysics*, *27*(3), 251–257. https://doi.org/10.3758/BF03204262

Ross, S. M., & Ross, L. E. (1981). Saccade latency and warning signals: Effects of auditory and visual stimulus onset and offset. *Perception & Psychophysics*, *29*(5), 429–437. https://doi.org/10.3758/BF03207356

Rugani, R., & Sartori, L. (2016). Numbers in Action. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*(July), 2014–2017. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00388

Ruiz Fernández, S., Rahona, J. J., Hervás, G., Vázquez, C., & Ulrich, R. (2011). Number magnitude determines gaze direction: Spatial-numerical association in a free-choice task. *Cortex*, *47*(5), 617–620. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.10.006

Salvaggio, S., Masson, N., Andres, M., Salvaggio, S., Masson, N., & Andres, M. (2018). Journal of Experimental Psychology : Learning , Memory , and Cognition Eye Position Reflects the Spatial Coding of Numbers During Magnitude Comparison Eye Position Reflects the Spatial Coding of Numbers During Magnitude Comparison. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*.

Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, *66*(4), 651–664. https://doi.org/10.3758/BF03194909

Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(2), 328–331. https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.328

Song, J. H., & Nakayama, K. (2008). Numeric comparison in a visually-guided manual reaching task. *Cognition*, *106*(2), 994–1003. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.03.014

Van der Stigchel, S., Heeman, J., & Nijboer, T. C. W. (2012). Averaging is not everything: The saccade global effect weakens with increasing stimulus size. *Vision Research*, *62*, 108–115. https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.04.003

Van der Stigchel, Stefan, & Nijboer, T. C. W. (2011). The global effect: what determines where the eyes land? *Journal of Eye Movement Research*, *4*(2), 1–13. https://doi.org/10.16910/jemr.4.2.3

Vitu, F. (2008). About the global effect and the critical role of retinal eccentricity : Implications for eye movements in reading. *Journal of Eye Movement Research*, *2*(3), 1–18.

Walker, R., Deubel, H., Schneider, W. X., & Findlay, J. M. (1997). Effect of Remote Distractors on Saccade Programming: Evidence for an Extended Fixation Zone. *Journal of Neurophysiology*, *78*(2), 1108–1119. https://doi.org/10.1152/jn.1997.78.2.1108

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

Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *57*, 209–219. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.005

Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: a meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, *4*(4), 489–525. https://doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.187

Wühr, P., & Seegelke, C. (2018). Compatibility between Physical Stimulus Size and Left-right Responses: Small is Left and Large is Right. *Journal of Cognition*, *1*(1), 17. https://doi.org/10.5334/joc.19

Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, *7*(10), 2. https://doi.org/10.1167/7.10.2

1.4 Article 3 – How does number magnitude influence temporal and spatial parameters of eye movements?

Pressigout, A., & Dore-Mazars, K. (in revision). How does number magnitude influence temporal and spatial parameters of eye movements? *Experimental Brain Research*. EXBR-D-19-00370

RESUME

Dans l'**Article 2**, nous avons montré que l'amplitude saccadique était susceptible d'être impactée par une information numérique. Néanmoins, l'effet de la magnitude numérique observé était concomitant avec un effet de la luminance. En parallèle, une récente étude de Fischer et al. (2018) a montré un impact des chiffres sur l'amplitude d'un mouvement de glissement du doigt dans un protocole où aucune cible visuelle n'était présentée. À la suite de cette étude, nous avons fait l'hypothèse que l'absence de cible pouvait favoriser l'émergence des effets numériques sur l'amplitude saccadique. Dans l'**Article 3**, 25 participants ont reçu pour consigne d'effectuer une saccade à gauche ou à droite en réponse à la magnitude d'un chiffre (i.e. supérieur ou inférieur à 5) présenté au centre de l'écran. L'effet SNARC (i.e. latence plus rapide des saccades vers la gauche en réponse à des petits chiffres et vers la droite en réponse à des grands chiffres) et l'effet de distance (i.e. latence plus rapide en réponse aux chiffres les plus éloignés du chiffre référence) ont été répliqués sur les latences des saccades et, pour la première fois, nous montrons un effet de distance sur l'amplitude des saccades. Les saccades étaient plus grandes pour les chiffres les plus éloignés du chiffre référence. Ces résultats suggèrent tout d'abord que l'étude de l'amplitude saccadique est une valeur ajoutée dans la compréhension des interactions entre le traitement numérique et ses conséquences sensori-motrices. Ils permettent également d'apporter des connaissances sur les conditions d'émergence des effets numériques sur l'amplitude des mouvements. De plus, nos résultats ont montré que l'effet de distance tendait à être plus marqué lorsque la consigne de réponse était congruente avec la ligne mentale de nombres, i.e., saccade à gauche/droite pour des chiffres inférieurs/supérieurs à 5 respectivement, plutôt que non congruente avec la ligne mentale (gauche/droite avec supérieur/inférieur à 5). Ces résultats ne nous permettent donc pas de conclure sur l'éventuel rôle de la ligne mentale numérique dans la relation entre les nombres et l'amplitude saccadique.

How does number magnitude influence temporal and spatial parameters of eye movements?

Version révisée du manuscrit n° EXBR-D-19-00370 soumis à Experimental Brain Research

Pressigout, A. & Dore-Mazars, K.

Université de Paris, VAC, F-92100 Boulogne-Billancourt, France

Alexandra Pressigout
Email address: alexandra.pressigout@parisdescartes.fr
Tel.: +33 (0)1 76 53 29 44

Abstract

The influence of numerical processing on individuals' behavior is now well documented. The spatial representation of numbers on a left-to-right mental line (i.e. SNARC effect) has been shown to have sensorimotor consequences, the majority of studies being mainly concerned with its impact on the response selection stage (i.e. reaction times). Its impact on the motor programming stage remains less documented although swiping movement amplitudes have recently been shown to be modulated by number magnitude. Regarding saccadic eye movements, the few available studies have not provided clear-cut conclusions. They showed that spatial-numerical associations modulated ocular drifts but not the amplitude of memory-guided saccades. Because these studies held saccadic coordinates constant, which might have masked potential numerical effects, we examined whether spontaneous saccadic eye movements (with no saccadic target) could reflect numerical effects. Participants were asked to look either to the left or to the right side of an empty screen to estimate the magnitude (< or > 5) of a centrally presented digit. Latency data confirmed the presence of the classical SNARC and distance effects. More critically, saccade amplitude reflected a numerical effect: participants' saccades were longer for digits far from the standard (1 and 9) and were shorter for digits close to it (4 and 6). Our results suggest that beyond response times, kinematic parameters also offer valuable information for the understanding of the link between numerical cognition and motor programming.

Keywords: Numerical processing, saccadic eye movement, mental number line, distance effect, saccade amplitude

Acknowledgements

We thank the editor and reviewers for considering this manuscript. This research received funding from a scholarship from the Ministry of Research (Alexandra Pressigout). We thank Agnes Charvillat for her help with the English version and Leo-Jun Leroy for his contribution to data collection.

Introduction

Numbers are ubiquitous in everyday life and the need to understand how the brain processes these abstract entities has attracted much attention in the past years (Dehaene 2011). Numerous studies have shown that the mere perception of numerical entities - and therefore their processing - impacts our actions. At the sensorimotor level, perceptual magnitudes such as spatial/temporal distance and object size are critical to perform immediate accurate body movements. Every movement requires the processing of numerical magnitude intrinsically linked to space and time dimensions. For example, motor coordinates of arm and hand movements have to be calibrated in magnitude for reaching and grasping an object correctly. The connection between numerical processing and motor outcomes has been integrated in the ATOM model proposed by Walsh (*A Theory of Magnitude* 2003) which assumes the existence of a common magnitude system shared by these three dimensions (space, time and number), and of neural substrates located in the parietal cortex (Bueti & Walsh 2009). These three dimensions shared a similar processing, obeying Weber law, suggesting that they are all perceptual dimensions (Whalen, Gallister & Gelman, 2012). Over the past few decades, lots of behavioral data have provided evidence for the spatial encoding of numbers, as illustrated in the well-known SNARC effect (*Spatial Numerical Association of Responses Codes*, Dehaene, Bossini & Giraux 1993; for a meta-analysis, see Wood, Willmes, Nuerk & Fischer 2008): small numbers elicit faster left lateral responses while large numbers elicit faster right lateral responses. The SNARC effect has been viewed as evidence that numbers are mentally represented along a left-to-right oriented mental number line (MNL), with small numbers associated with the left side and large numbers with the right one. Probably due to cultural representations reflecting the MNL (such as rulers or historical timelines), this metaphor seems to be deeply intuitive. In addition, populations that do not share the left-to-right reading and writing system of Western cultures have been shown to exhibit a weaker or even a reverse SNARC effect, supporting the idea of a universal but flexible MNL (Hung, Hung, Tzeng & Wu 2008; Shaki, Fischer & Petrusic 2009; Zebian 2005). Number-space associations have essentially been found to impact speed of motor responses and/or accuracy of perceptual responses produced with different effectors such as hands (Dehaene et al. 1993; Hesse, Fiehler & Bremmer 2016), head (Loetscher, Schwarz, Schubiger & Brugger 2008) or even eyes (Fischer, Warlop, Hill and Fias 2004; Hesse et al. 2016; Pressigout, Charvillat, Mersad & Doré-Mazars 2018; Schwarz & Keus 2004).

According to ATOM (Walsh 2003), perceptual dimensions such as number, space and time impact motor outputs, an assumption supported by neural studies (Bueti & Walsh 2009; Cantlon, Platt & Brannon 2009; Winter, Marghetis & Matlock 2015). Indeed, motor programming and numerical processing (at least) partially share brain regions in the parietal lobe (Grefkes & Fink 2005; Shuman & Kanwisher 2004; Walsh 2003). If numerical processing impacts motor programming, temporal (i.e. reaction times) and spatial parameters (i.e. direction and amplitude) of motor outcomes should both reflect perceptual processing (Rugani & Sartori 2016). Only a few studies have investigated such an

impact on spatial parameters. For instance, grip aperture (Andres, Ostry, Nicol & Paus 2008; Lindemann, Abolafia, Girardi & Bekkering 2007) was modified as a function of number magnitude, suggesting that motor programming can be impacted just as response selection (Seegelke & Wühr 2018).

Regarding eye movement studies (for reviews, see Hartmann, Mast & Fischer 2015, 2016; Mock, Huber, Klein & Moeller 2016), Fischer et al. (2004) were the first to observe a SNARC effect on saccade latencies using a protocol in which participants had to make a saccade toward a remembered target either to the left or the right side, in response to the parity of a centrally presented number. However, they failed to observe a spatial-numerical effect on saccade amplitude. Interestingly, other studies have found such an effect on saccade direction. When participants have to explore a visual screen after being presented with a number, they are more likely to execute leftward saccades after small numbers and rightward saccades after large numbers, indicating that gaze direction is influenced by number magnitude (Fernandez, Rahona, Hervas, Vasquez & Ulrich 2011; Salvaggio, Masson & Andres 2018). If number processing interferes with eye movement direction shaped by the spatial-numerical mapping, it remains unclear whether it also interferes with eye movement extent (i.e. saccade amplitude). To explain the absence of a SNARC effect on saccade amplitude in Fischer et al.'s study (2004), Wood et al. (2008) proposed that amplitude may not have discriminated lateralized responses because the target eccentricity was held constant. Moreover, the learning of a saccadic vector with spatial coordinates during the training phase (visual targets were displayed during this phase) could have 'inhibited' the expected number magnitude effect. This account is compatible with the results of a recent study on swiping movements (Fischer, Fischer, Huber, Strauß & Moeller 2018) in which movement amplitude depended on number magnitude. In the protocol, participants had to swipe with their forefinger a central cross to the left or the right side of an empty screen (without target) depending on the magnitude or the parity of a number presented just below the cross. We hypothesize that a similar protocol using eye movements should help to observe a numerical impact on saccade amplitude. Indeed, there is some evidence that saccade programming interferes with number processing (Burr, Ross, Binda & Morrone 2011; Ranzini, Lisi & Zorzi 2016). For example, making a short or a long saccade impacts response time in magnitude comparison tasks (Irwin & Thomas 2007).

The purpose of the present experiment was to determine whether number magnitude affected saccade amplitude. In response to the magnitude of a centrally presented digit, participants had to make a saccade toward the left or the right side of an empty screen, depending on whether it was smaller or larger than 5 (the standard number). Both congruent (small/left and large/right) and incongruent (small/right and large/left) conditions were performed by all participants. The absence of a saccadic target is expected to increase the variability of saccade amplitude and therefore to foster the emergence of a SNARC effect. Based on previous studies showing spatial-numerical associations in reaction times, saccade latencies are expected to be faster for congruent than incongruent conditions, resulting in a crossed interaction between response side and number magnitude. Moreover, as usually

observed in number magnitude classification tasks (Wood et al. 2008), a distance effect is expected (Moyer & Landauer 1967): as two numbers numerically distant are more easily discriminated than two close numbers, saccade latencies should be slower for digits close to the standard 5 (4 and 6) than for digits far from it (1 and 9).

On saccade amplitude, there is no obvious basis for expecting a numerical-space effect. Generally, the SNARC effect on latencies corroborates the prediction of the dual-route model (Gevers, Verguts, Reynvoet, Caessens & Fias 2006) whereby incongruent conditions (small numbers/right side and large numbers/ left side) lead to a cognitive conflict increasing both response latency and response accuracy in judgment tasks. This model predicts congruency effects on the response selection stage but not on the programming of saccade amplitude. However, on the basis of ATOM, larger numbers should induce longer saccades than smaller ones, as the model predicts that changes in one domain will impact another domain in the same way (*more A-more B hypothesis*, Walsh 2003; Bueti & Walsh 2009). We also expect a distance-like effect on saccade amplitude (see for similar findings Fischer et al. 2018 on swiping movement, Ganor-Stern & Goldman 2015 and Song & Nakayama 2008 on hand movement trajectories), leading to shorter saccades for smaller numerical distance (4 and 6) and longer saccades for larger numerical distance (1 and 9). The greater the numerical distance from the standard 5, the longer the saccade.

Method

Participants

Twenty-five students of Paris Descartes University participated in the experiment (eighteen females, average age of 22 years, two self-reported left-handed) for course credit. All of them were French native speakers, had normal or corrected-to-normal vision. They signed an informed consent prior to their inclusion in the study, the latter having been approved by the local Ethics Committee of Paris Descartes University (N° CER-PD: 2018-62).

Stimuli and material

The experiment was designed on Experiment Builder® (SR Research, Ontario CA). Digits from 1 to 9 excluding 5 (the standard used to the magnitude comparison) were presented in white uppercase (font Arial, size 18) in the center of a gray screen (RGB: 128,128,128). The fixation cross was composed of two bars of 0.4 degrees (overall 52 pixels). Stimuli were displayed on a 24.5 inches BENQ screen (ZOMIE XL-2540) with a refresh rate of 144 Hz and a spatial resolution of 1920x1080 pixels (1°=35px). Viewing was binocular but only eye movements of the right eye were recorded by an EyeLink® 1000 (SR Research, Ontario CA) at a sampling rate of 1000 Hz and spatial resolution of 0.05°. Distance between the participant's eye and the screen was 57 cm, considering that the participant's head was maintained by a chin rest and a head restraint.

Experimental design

In the congruent condition, participants had to make as fast as possible a saccade to the left if the presented digit was smaller than 5, and to the right if it was larger than 5. Response side was reversed in the incongruent condition (saccade to the left for digits > 5 and to the right for digits < 5). All participants performed successively the two experimental conditions in a counterbalanced order. To familiarize participants with these two response conditions, each of the latter began with a small training block in which the eight test digits were presented once in random order. Both training blocks were followed by 120 experimental trials (per condition) including fifteen presentations of each test digit. At the beginning of each response condition, participants went through a calibration procedure in nine points around the screen. A trial began with the display of a fixation cross in the center of the screen for 500 milliseconds. Fixations were automatically checked so that if participants looked out of an invisible window of 1.5 x 1.5° around the fixation cross, the trial was stopped and instantly re-run. Otherwise, a digit replaced the fixation cross. Participants were told they would see digits between 0 and 9 excepted 5 at the screen center. They were instructed to decide as fast and accurate as possible whether each digit was smaller or larger by moving their eyes to the left or to the right (or the reverse) part of the screen. The central digit vanished once a saccade amplitude exceeding 1.5° was detected, then an empty screen was displayed for 1500 milliseconds before the next trial. If no saccade was detected before 1800 milliseconds, the trial was re-run later. Participants took a short break between the two trial blocks (i.e. response conditions). The experiment lasted about 20 minutes, plus 10 more minutes required to fill in questionnaires on handedness, visual health and socio-cultural characteristics (i.e. sex, age, writing habits).

Data analyses

We recorded saccade latency (in milliseconds), namely the time between digit display and saccade onset, as well as saccade amplitude (in degrees), i.e. the distance between launching and landing positions of saccades. These parameters were extracted using Eyelink Data Viewer® (SR Research, Ontario, Canada). Besides incorrect responses (4.90%), trials removed from the analyses included those containing a blink (1.58%) and/or saccade latencies shorter than 100 or longer than 1000 milliseconds (0.78%). Outliers on latency (4.85%) and amplitude (4.07%) were removed based on the classic mean ± 2*standard deviation from individuals' mean. Overall, 86.35% of data were analyzable per subject.

Separate analyses were carried out to investigate the spatial-numerical association (SNARC effect) and the numerical distance effect both on saccade latency and amplitude.

Analyses of variance for the spatial-numerical effect were conducted with Condition Order (congruent-incongruent *vs.* incongruent-congruent) as a between subject factor, and Quantity (<5 *vs.* >5), Response Side (left *vs.* right) and Parity (odd *vs.* even) as within-subject factors. The Parity factor

was added in order to spot a possible MARC effect (Markedness Association of Responses Codes) reflecting a left-odd and right-even association between space and numbers, although this effect is stronger when numbers appear in their orthographic form (Nuerk, Iversen & Willmes 2004). To test for the presence of a SNARC effect, we also used a method proposed by Fias (1996). For each participant and each number magnitude, we first calculated the difference between saccadic latencies (dSL) to the right (R) and to the left (L): dSL = R - L. Then, we computed a regression analysis on dSL as a function of number magnitude for each participant. The mean of individual slopes was tested against zero. A negative slope denotes a SNARC effect, i.e. latencies to initiate a saccade to the right increase with number magnitude.

The analysis of the distance effect was conducted with Order Condition as a between subject factor, and with Numerical Distance from 5 (1-4) × Congruence (congruent *vs.* incongruent) as a compound within-subject factor. To determine whether the hypothetical MNL interacted with numerical distance, the Congruence factor replaced the Quantity and Response Side factors. Thus, in the congruent modality, leftward saccades in response to digits smaller than 5 and rightward saccades in response to digits larger than 5 are brought together while in the incongruent modality, the reversed conditions are grouped (leftward saccades / large digits, rightward saccades / small digits). As the digits associated to the largest numerical distance (four) are odd (1 and 9), while all those associated to the smallest numerical distance (one) are even (4 and 6), the Parity factor was not relevant to this analysis. Data analysis was realized with Statistica® and RStudio software (RStudio Team, 2015) and Tukey's post-hoc analyses were used to determine significant differences.

Results

Latency analyses

1. SNARC and MARC effects

The main effects of Quantity and Response side were not significant, latencies did not vary as a function of number magnitude or response side ($F<1$). The main effect of Parity revealed that odd numbers elicited faster responses than even ones [odd: 411±19ms, even: 423±24ms, $F(1,23)=8.77$, $p=0.007$, $\eta^2_p= 0.27$], contrary to the findings of previous studies (hand movements: Nuerk et al. 2004; saccadic eye movements: Pressigout et al. 2018). As mentioned in the data analyses section, this result was probably due to the distance effect, namely the fact that largest numerical distance (1 and 9) from the standard also corresponded to odd numbers, leading to faster saccade latencies. We did not observe the MARC effect as the interaction between Parity x Response Side was not significant ($F<1$). As expected, the interaction between Quantity and Response Side was significant [$F(1,23)=13.79$, $p=0.001$, $\eta^2_p= 0.37$, Figure 1], reflecting the SNARC effect. Post-hoc analyses revealed that the latency difference between leftward and rightward saccades was significant for digits smaller than 5

(p=0.04) and tended to be significant for digits larger than 5 (p=0.07). Surprisingly, the SNARC effect significantly interacted with Condition Order [$F(1,23)$=8.70, p=0.007, η^2_p= 0.27]. This three-way interaction was due to the fact that the significant (or nearly significant) differences between left and right saccades for both small (p=0.03) and large digits (p=0.06) were limited to the incongruent-congruent group (all p=1 in the congruent-incongruent group). This implies that only participants beginning with the incongruent condition exhibited a SNARC effect. No other interaction was significant.

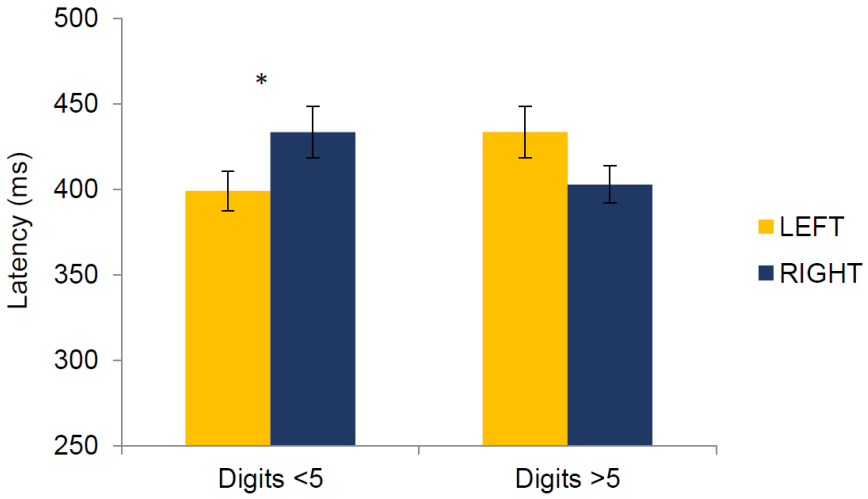

Fig. 1 Mean saccade latency in milliseconds as a function of Quantity (<5 vs. >5) and Response Side (left vs. right). The crossed-interaction reflects the presence of the SNARC effect. Error bars indicate standard error around the mean. *p<0.05, significant differences between left and right saccades for numbers smaller than 5.

To further examine the SNARC effect, we assessed the individual regression slopes of the latency differences between the right-left saccades for each number magnitude in both groups separately (Fias, 1996, see data analyses section). For the group beginning with the incongruent condition, the mean coefficient slope (-19.57) significantly differed from 0 [$t(12)$=-5.37, p<0.001], reflecting a strong SNARC effect, whereas the mean coefficient slope (-2.21) in the other group did not differ from 0 [$t(11)$=-0.5, p=0.6]. The difference between the two mean slopes was significant [$t(21.85)$=3.04, p=0.006] and overall, the mean coefficient slope (-9.49) significantly differed from zero [$t(24)$=-3.411, p=0.002] indicating the presence of a global SNARC effect, despite the effect of Condition Order. To better understand these group differences, we included Block Position (first or second), in the ANOVA, so as to examine whether this factor impacted latencies, irrespective of congruence. Indeed, the main effect of Block Position turned out to be significant [$F(1,23)$=9.62, p=0.005] regardless of (in)congruence: the second block elicited faster saccadic responses than the first one, probably due to a training effect. Since the second block produced faster responses than the first one, and since congruence is supposed to trigger faster responses than incongruence, it may be assumed that participants first presented with the congruent condition could merely exhibit a dimmed SNARC

effect. Indeed, a training effect has probably offset the higher latencies normally induced by incongruence. Conversely, participants first presented with the incongruent condition exhibited a stronger effect.

2. Distance effect

The main effect of Numerical Distance on latency was significant [$F(3,69)=14.39$, $p<0.001$, $\eta^2_p= 0.38$] and did not interact with Congruence. Post-hoc analyses revealed that the numerical distance 1 significantly differed from the other ones (all $p<0.001$). We found a main effect of Congruence [$F(1,23)=13.79$, $p=0.001$, $\eta^2_p= 0.37$] that reflects the SNARC effect, i.e. participants were faster to initiate saccades in the congruent condition (401±11 ms) than in the incongruent one (432±14 ms). The interaction between Congruence and Condition Order was also significant [$F(1,23)=8.71$, $p=0.007$, $\eta^2_p= 0.27$], which is probably due to the training and SNARC effects discussed above. Post-hoc revealed that the incongruent block induced slower saccades (1) in the first block (463±19 ms) than in the second one (401±20 ms) and (2) compared to the congruent block, completed in the first (395±16 ms) or in the second block (407±18 ms) (all ps<0.02).

A regression analysis revealed that saccade latencies decreased with numerical distance from the standard, and that the mean regression slope (-9.485) highly differed from 0 [$t(24)=-4.95$, $p<0.001$, cf. Figure 2], confirming the distance effect on latencies.

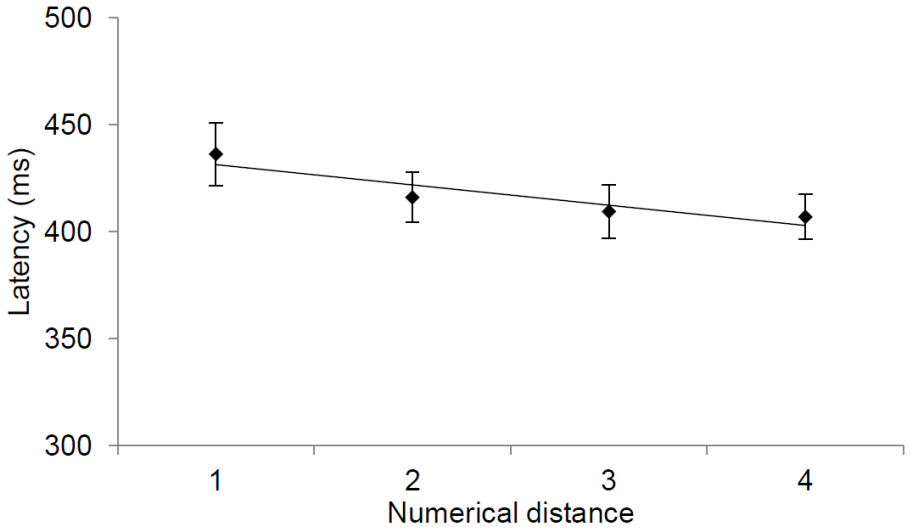

Fig. 2 Mean saccade latency in milliseconds and regression line as a function of Numerical Distance. The negative slope indicates that latencies decrease with numerical distance. Error bars indicate standard error around the mean.

Amplitude analyses

In order to discard possible spatial biases during fixation, we first ensured that the starting positions of saccades did not differ in the different conditions (number x response side and numerical distance x

congruence, all p>0.05). To compensate for the (expected) scattering of mean individual saccade amplitudes (mean=16.06±4.36°, min=6.98° and max=22.87°), the data were normalized for each participant in each condition (congruent and incongruent) following the usual formula: z_i = (amplitude$_i$ – mean (amplitude)) / sd (amplitude) when *i* is the trial and *sd* the standard deviation of the mean. The following analyses were thus realized on means of saccade amplitudes in z scores. A negative (or positive) z score in one condition means that saccade amplitudes in that condition were shorter (or longer) than its mean amplitude across all conditions.

1. SNARC and MARC effects

The main effect of Quantity was not significant, amplitude did not differ for small and large digits (F<1). Contrary to Fischer et al. (2004) who found larger saccades to the right than to the left, we did not find a main effect of Response Side (F<1). The only significant interaction was between Quantity and Parity [F(1,23)=5.36, p=0.03, η^2_p=0.18] due to shorter amplitudes (z score=-0.08, corresponding to 15.90°) for even digits > 5 (6 and 8) than for even digits < 5 and odd digits < 5 and > 5 (all p<0.05). Neither a SNARC nor a MARC effect were found (F<1).

2. Distance effect

The counterbalanced factor showed no main effect [F(1,23)=3.22, p=0.08, η^2_p= 0.12] and did not interact with other factors [all ps>0.27]. The main effect of Numerical Distance was significant [F(3,69)=3.72, p=0.01, η^2_p= 0.14, cf. Figure 3). Post-hoc analyses revealed that the mean amplitude for the distance 1 (z = -0.06 or 15.99°) was smaller than for the distance 3 (z = -0.01 or 16.06°; p=0.01), the latter being smaller than for the distance 4 (z = 0.09 or 16.33°; p=0.04). This means that the distance between test digits and the standard 5 influenced saccade amplitude: saccades were longer for end values (the largest and the smallest values of the tested set here were 1 and 9) and shorter for intermediate ones (4 and 6). Numerical distance tended to interact with Congruence [F(3,69)=2.42, p=0.07, η^2_p=0.10]. The mean regression slope (0.049) significantly differed from 0 [t(24)=2.42, p=0.024] indicating that saccade amplitude increased with numerical distance. To further investigate the close-to-significant interaction between Numerical distance and Congruence, the same regression analysis was performed for each block (congruence vs. incongruence). The mean regression slope for the congruent condition (0.066) significantly differed from zero [t(24)=2.18, p=0.039] while it was merely close to significance for the incongruent condition [mean slope= 0.033, t(24)=1.92, p=0.067]. This result could suggest that the distance effect tends to be stronger when task demands are compatible with the MNL.

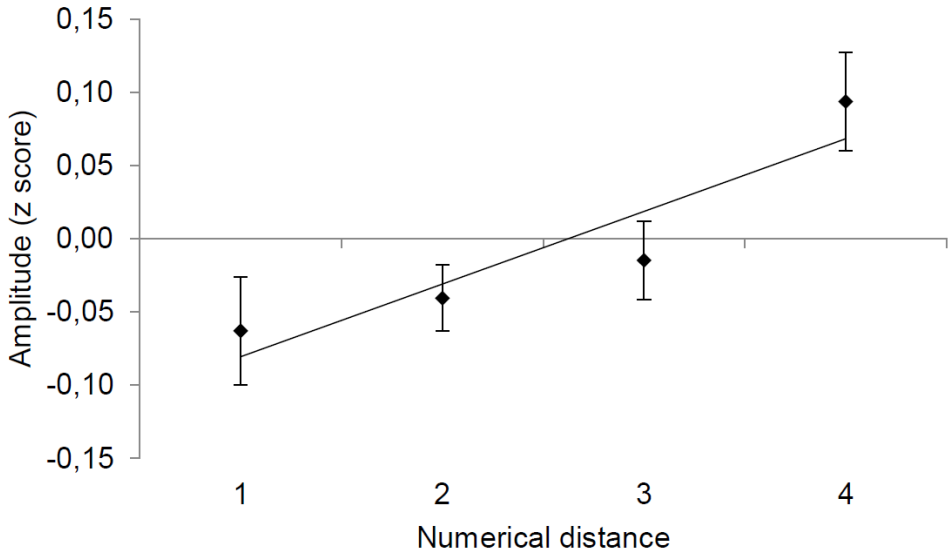

Fig. 3 Mean amplitude (in z score) and regression line as a function of numerical distance. The positive slope indicates that amplitude increases with numerical distance. Error bars indicate standard error around the mean

Discussion

The present study examined whether numbers and their spatial representations could affect eye movement parameters such as saccade amplitude. In the congruent condition, participants performed a magnitude comparison task in which they had to look to the left when test digits were < 5 and to the right when they were > 5. In the incongruent condition, the instructions were reversed.

First, this study replicates the SNARC effect on saccade latencies: leftward saccades were initiated faster in response to digits < 5 whereas rightward saccades were initiated faster in response to digits > 5. In addition, saccade latencies were also shaped by numerical distance: saccadic reaction times to classify test digits increased as their magnitude was closer to the standard digit '5'. This result is consistent with previous studies, especially with those using the magnitude comparison tasks (Wood et al. 2008). Moreover, a significant correlation between individual distance effects and latencies was found (Pearson-r-correlation, r=-0.56, p=0.003): participants who exhibited a strong distance effect are also those whose latencies were the slowest. This correlation between the size of the individual SNARC effect and latencies was very close to significance (Pearson-r-correlation r=-0.36, p=0.07), suggesting that both numerical (SNARC and distance) effects need time to impact saccade latencies (Didino et al. 2009, Pressigout et al. 2018, Wood et al. 2008). These results confirm that our protocol with no predefined saccade target induced numerical effects, and they suggest that not only does number magnitude have been processed, but that numbers have also been spatially encoded.

The main goal of our study was to test whether kinematic parameters reflected number processing. This study is the first showing a numerical distance between test digits and a standard digit on saccade amplitude; indeed, saccade amplitude became longer as numerical distance increased. This result highlights the influence of number processing on saccade programming and is consistent with

previous studies showing its impact on grasping movements (Andres et al. 2008; Lindemann et al. 2007). Previous eye movement studies have reported an ocular bias during number processing (Loetscher et al. 2010, Myachykov et al. 2015, 2016; Salvaggio et al. 2018) or arithmetic problem solving (Hartmann et al. 2015, 2016; Klein, Huber, Nuerk & Moeller 2014; Masson, Letesson & Pesenti 2018). For instance, the oral presentation of numbers to participants performing a fixation task induced micro-saccade changes to the left or to the right as a function of the number magnitude (Myachykov et al., 2015). Thinking to a number also seems to induce such an ocular bias as shown by Loetscher et al. (2010). In a generation task, their participants were required to generate numbers between 1 and 30. Eye positions were recorded 500 milliseconds before each number generation. Results showed that the direction and the size of eye positions predicted the next generated number. Leftward/rightward changes in eye position predict whether the next number will be smaller/larger than the last one respectively whereas the size change in eye movement predicts the size change in numerical magnitude. These results denote a correlation between the eye position and the next number generation. However, they do not indicate the causal relation between the two variables. In other words, whether number generation causes changes in eye position (direction and size) or, at the reverse, changes in eye position influence which number will be generated remains an open question. In our study, number processing arrives before saccade programming. Regarding saccades, Fischer et al. (2004) reported a SNARC effect on their latency but failed to observe it on their amplitude, although they reported a tendency for shorter saccades for intermediate magnitude digits than for end ones (p<0.08). Such a distance-like effect is in line with our findings although the authors did not assess the distance effect as we did, by grouping number stimuli as a function of their numerical distance. The weak numerical effect on amplitude in Fischer et al.'s study (2004) may be due to the protocol they used. Indeed, they asked their subjects to make saccades towards a memorized target localization in order to induce memory-guided saccades known to increase the variability of saccade amplitude. However, the fact that spatial coordinates of the memorized target did not vary during their experiment may have hindered the observation of a numerical effect. Rather, we assume that leaving participants free to perform a movement (as in Fischer et al.'s experiment on swiping movements, 2018) makes it easier to observe the effect of numerical processing on amplitude. When response direction is not constrained by the task (Fernandez et al. 2011: Salvaggio et al. 2018), such a numerical effect is also observed on this motor parameter. For instance, in a study in which participants had to freely choose to press a left or a right key in response to a digit, response side was affected by digit magnitude (Daar & Pratt 2008). Overall, one could say that critical motor parameters (i.e. direction, trajectory and amplitude) can reflect number processing when task constraints (response instructions) do not preclude it.

Beyond the impact of number processing on saccade amplitude, the question remains of whether landing positions reflect number positions along the MNL. Contrary to studies on hand trajectories in which participants were guided by a visual marker (squares: Song & Nakayama 2008; unmarked

number line: Dotan & Dehaene 2013) to aim at coordinates along the MNL, we did not find noticeable differences in amplitude between each number magnitude. Indeed, the small intra-individual variability in amplitude (mean of individual standard deviation = 1.6°) rather supports the idea that participants mentally defined a marker the coordinates of which varied as a function of number magnitude. Moreover, this distance effect appeared to be more marked when instructions were congruent with the MNL (i.e. to make leftward/rightward saccades for digits smaller/larger than 5 respectively) as suggested by the nearly significant interaction between numerical distance and congruence with the MNL. To our knowledge, such an interaction on kinematic parameters remains poorly documented. Song and Nakayama (2008), who found a distance effect on visually guided manual reaching movements, only tested left-right response mappings (they presented a rule with small numbers on the left and large numbers on the right). In addition, the interaction between numerical distance and response side on hand trajectories was not significant in Ganor-Stern and Goldman's study (2015), probably due to the fact that their subjects were Hebrew speakers: indeed, the SNARC effect has been found to be weaker (if not absent), in right-to-left languages (Shaki et al. 2009). While the MNL does not influence distance effect on latencies, its influence on kinematic parameters needs further research to be clarified.

Our results show that saccade latency and saccade amplitude are two dependent variables reflecting number processing; however, the spatial-numerical association seems to affect more readily the temporal than the spatial parameters of eye movements. The model of saccade generation proposed by Findlay & Walker (1999) describes two pathways working separately (where and when) during the spatial and the temporal programming of movements: the "where" stream deals with the calculation of saccadic vectors whereas the "when" stream decides when to trigger saccades. In this frame, each parameter could thus be differently impacted by the abstract concept of number. Moreover, our data suggest that the SNARC and the distance effects depend on individual latencies (i.e. stronger effect for slower latencies) whereas the effect of distance on amplitude does not seem to be time-dependent (Pearson-r-correlation r=0.30, p=0.15). This would be compatible with the studies of Myachykov et al. (2005) and Salvaggio et al. (2018) in which oculomotor biases were observed quickly after numbers were presented, suggesting that semantic activation occurs very early during the planning stage. In contrast, the time-dependency hypothesis (Didino et al. 2019) supports the idea that response latency is subjected to speed constraints.

The interference between numerical processing and saccades also depends on neural connectivity constraints. In this regard, the parietal lobe is well-known as a major neural substrate for number and space representations (Cantlon et al. 2009; Dehaene et al. 2003; Hubbard, Piazza, Pinel & Dehaene 2005). More interestingly for our purpose, the parietal lobe is also involved in spatial processing during saccadic eye movement (Colby & Goldberg 1992) and in saccade programming during arithmetical tasks (Knops, Thirion, Hubbard, Michel & Dehaene 2009; Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan & Dehaene 2002). These neuro-functional studies support the idea of a neural link between

saccades and numbers. Moreover, dorsal processing, stretching from the occipital to the parietal lobe, might be expected to cause stronger interferences with saccades than ventral processing (Findlay & Walker, 1999). In line with this hypothesis, the magnitude comparison task is known to involve the dorsal stream (Fias, Lauwereyns & Lammertyn 2001) and therefore is more likely to interfere with saccades. For instance, Irwin and Thomas (2007) have found an impact of saccades on number processing with a magnitude comparison task but did not find this effect with a parity judgment task. Thus, it would seem that the nature of the numerical task chosen as well as the absence of a visual target is critical to observe a numerical effect on saccade amplitude.

To conclude, the present study shows that saccade amplitude is a variable of interest in the investigation of numerical effects. Without predefined visual targets, saccades were longer in response to digits far from a numerical standard. This suggests that beyond well-known effects on response times, the way an action is programmed and executed can also be modulated by numerical processing (Wood et al., 2008). However, the impact of the mental number line remains unclear as the distance effect on saccade amplitude tends to be stronger when instructions are congruent with the mental number line (i.e. leftward saccades for small numbers and rightward saccades for large numbers). Lastly, the way the spatial-numerical association shapes movement amplitude has yet to be clarified in further research, and the detailed investigation of kinematic parameters is likely to improve our understanding of sensorimotor consequences of number processing. Although many questions remain to be investigated, there is growing evidence that motor magnitudes should be integrated to the common magnitude system previously restricted to perceptual dimensions.

Compliance with Ethical Standards

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Ethical approval: All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional and/or national research committee (local Ethics Committee of Paris Descartes University, N° CER-PD: 2018-62) and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards.

Informed consent: Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

References

Andres, M., Ostry, D. J., Nicol, F., & Paus, T. (2008). Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, *44*(4), 414-419.

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.

Burr, D. C., Ross, J., Binda, P., & Morrone, M. C. (2010). Saccades compress space, time, and number. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(12), 528-533.

Cantlon, J. F., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in cognitive sciences*, *13*(2), 83-91.

Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1992). The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements. *Science*, *255*(5040), 90-92.

Daar, M., & Pratt, J. (2008). Digits affect actions: the SNARC effect and response selection. *Cortex*, *44*(4), 400-405.

Dehaene, S. (1997). *The number sense: How the mind creates mathematics*. New York: Oxford University Press.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of experimental psychology: general*, *122*(3), 371.

Didino, D., Breil, C., & Knops, A. (2019). The influence of semantic processing and response latency on the SNARC effect. *Acta psychologica*, *196*, 75-86.

Dotan, D., & Dehaene, S. (2013). How do we convert a number into a finger trajectory?. Cognition, 129(3), 512-529.

Fernández, S. R., Rahona, J. J., Hervás, G., Vázquez, C., & Ulrich, R. (2011). Number magnitude determines gaze direction: Spatial–numerical association in a free-choice task. *Cortex*, *47*(5), 617-620.

Fias, W. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical cognition*, *2*(1), 95-110.

Fias, W., Lauwereyns, J., & Lammertyn, J. (2001). Irrelevant digits affect feature-based attention depending on the overlap of neural circuits. *Cognitive Brain Research*, *12*(3), 415-423.

Findlay, J. M., & Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(4), 661-674.

Fischer, U., Fischer, M. H., Huber, S., Strauß, S., & Moeller, K. (2018). The influence of number magnitude on continuous swiping movements. *Journal of Numerical Cognition*, *4*, 297-316.

Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L., & Fias, W. (2004). Oculomotor bias induced by number perception. *Experimental Psychology*, *51*(2), 91-97.

Ganor-Stern, D., & Goldman, R. (2015). Reaching towards an end: Numerical end and distance effects in motor movements. *Journal of Cognitive Psychology*, *27*(4), 490-498.

Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B., & Fias, W. (2006). Numbers and space: A computational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(1), 32.

Grefkes, C., & Fink, G. R. (2005). The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *Journal of anatomy*, *207*(1), 3-17.

Hartmann, M., Mast, F. W., & Fischer, M. H. (2015). Spatial biases during mental arithmetic: Evidence from eye movements on a blank screen. *Frontiers in Psychology*, *6*, 12.

Hartmann, M., Mast, F. W., & Fischer, M. H. (2016). Counting is a spatial process: evidence from eye movements. *Psychological Research*, *80*(3), 399-409.

Hesse, P. N., Fiehler, K., & Bremmer, F. (2016). SNARC effect in different effectors. *Perception*, *45*(1-2), 180-195.

Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*(6), 435.

Hung, Y. H., Hung, D. L., Tzeng, O. J. L., & Wu, D. H. (2008). Flexible spatial mapping of different notations of numbers in Chinese readers. *Cognition*, *106*(3), 1441-1450.

Irwin, D. E., & Thomas, L. E. (2007). The effect of saccades on number processing. *Perception & psychophysics*, *69*(3), 450-458.

Klein, E., Huber, S., Nuerk, H. C., & Moeller, K. (2014). Operational momentum affects eye fixation behaviour. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(8), 1614-1625.

Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science*, *324*(5934), 1583-1585.

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.

Loetscher, T., Bockisch, C. J., Nicholls, M. E., & Brugger, P. (2010). Eye position predicts what number you have in mind. *Current Biology*, *20*(6), R264-R265.

Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology*, *18*(2), R60-R62.

Macnamara, A., Keage, H. A., & Loetscher, T. (2018). Mapping of non-numerical domains on space: a systematic review and meta-analysis. *Experimental Brain Research*, *236*(2), 335-346.

Masson, N., Letesson, C., & Pesenti, M. (2018). Time course of overt attentional shifts in mental arithmetic: evidence from gaze metrics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(4), 1009-1019.

Mock, J., Huber, S., Klein, E., & Moeller, K. (2016). Insights into numerical cognition: Considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research*, *80*(3), 334-359.

Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, *215*(5109), 1519.

Myachykov, A., Cangelosi, A., Ellis, R., & Fischer, M. H. (2015). The oculomotor resonance effect in spatial–numerical mapping. *Acta psychologica*, *161*, 162-169.

Myachykov, A., Ellis, R., Cangelosi, A., & Fischer, M. H. (2016). Ocular drift along the mental number line. *Psychological Research*, *80*(3), 379-388.

Nuerk, H. C., Iversen, W., & Willmes, K. (2004). Notational modulation of the SNARC and the MARC (linguistic markedness of response codes) effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *57*(5), 835-863.

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., & Doré-Mazars, K. (2018). Time dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. *Psychological research*, 1-11.

Ranzini, M., Lisi, M., & Zorzi, M. (2016). Voluntary eye movements direct attention on the mental number space. *Psychological research*, *80*(3), 389-398.

Rugani, R., & Sartori, L. (2016). Numbers in action. *Frontiers in human neuroscience*, *10*, 388.

Salvaggio, S., Masson, N., & Andres, M. (2018). Eye position reflects the spatial coding of numbers during magnitude comparison. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*.

Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, *66*(4), 651-664.

Seegelke, C., & Wühr, P. (2018). Compatibility between object size and response side in grasping: the left hand prefers smaller objects, the right hand prefers larger objects. *PeerJ*, *6*, e6026.

Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic bulletin & review*, *16*(2), 328-331.

Shuman, M., & Kanwisher, N. (2004). Numerical magnitude in the human parietal lobe: Tests of representational generality and domain specificity. *Neuron*, *44*(3), 557-569.

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.

Song, J. H., & Nakayama, K. (2008). Target selection in visual search as revealed by movement trajectories. *Vision research*, *48*(7), 853-861.

Team, R. (2015). RStudio: integrated development for R. *RStudio, Inc., Boston, MA URL http://www. rstudio. com*, *42*, 14.

Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in cognitive sciences*, *7*(11), 483-488.

Whalen, J., Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1999). Nonverbal counting in humans: The psychophysics of number representation. *Psychological Science*, *10*(2), 130-137.

Winter, B., Marghetis, T., & Matlock, T. (2015). Of magnitudes and metaphors: Explaining cognitive interactions between space, time, and number. *Cortex*, *64*, 209-224.

Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H. C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: a meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, *4*(4), 489-525.

Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: The SNARC effect and the reverse SNARC effect in English and Arabic monoliterates, biliterates, and illiterate Arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture*, *5*(1-2), 165-190.

POINTS-CLES

- L'effet SNARC nécessite du temps pour émerger sur les réponses comportementales. Nous avons identifié plusieurs facteurs modulant sa force tels que le temps d'initiation de la réponse motrice, le temps de traitement de la quantité selon le format numérique et la rapidité des participants. Des temps de réponse plus longs et un temps d'activation de la quantité plus court engendrent un effet SNARC plus prononcé.
- L'information numérique véhiculée par un chiffre lorsqu'il est la cible d'un mouvement saccadique impacte la préparation saccadique : viser un chiffre de petite magnitude entraîne des saccades de plus petites amplitudes.
- L'effet global induit par un distracteur sur la visée d'une cible saccadique peut être modulé par la magnitude numérique des stimuli lorsque celle-ci est renforcée par l'intensité lumineuse. Dans une configuration visuelle formée par deux chiffres spatialement proches, le chiffre le plus fort numériquement et le plus lumineux entraîne une plus grande attraction de la saccade vers lui.
- Dans un protocole d'effet SNARC dans lequel le participant doit effectuer une saccade vers la gauche ou vers la droite, sans cible prédéfinie, en fonction de la grandeur d'un chiffre par rapport à une référence (< ou > 5), les participants effectuent de plus grandes saccades pour les chiffres les plus éloignés de la référence (1 et 9) et de plus petites saccades pour les chiffres intermédiaires (4 et 6) de l'intervalle numérique testé.

2 Axe 2 : influence des changements moteurs sur la perception

Le second objectif de cette thèse était d'examiner si des modifications motrices pouvaient induire des changements perceptifs d'objets visuels. Cette question n'est pas abordée dans le modèle de Walsh (2003), néanmoins, l'influence réciproque entre action et perception a été de nombreuses fois abordée dans la littérature. Nous avons montré dans l'axe 1 qu'une information de quantité était susceptible d'impacter la programmation saccadique puisque l'amplitude de la saccade reflète un traitement numérique. Ces résultats suggèrent donc des bases communes utilisées pour la perception de ces magnitudes et la transformation sensori-motrice. Si des paramètres moteurs partagent le système généralisé de magnitude avec les dimensions perceptives, nous avons fait l'hypothèse que la modification de l'amplitude saccadique devrait impacter la perception de taille et de temps d'un objet visuel, à savoir, une réduction d'amplitude entraînerait une diminution de la taille et du temps perçus.

Les participants devaient conjointement réaliser une tâche saccadique et une tâche perceptive de comparaison de tailles de ronds (**Article 4**) ou de durées de présentation de ronds (**Etude 5**). Dans un premier temps, le but était d'examiner si la perception de la taille et du la durée d'un objet variait avec l'amplitude des saccades en étudiant sa variabilité inhérente. Dans un second temps, nous avons utilisé le paradigme d'adaptation saccadique pour réduire expérimentalement l'amplitude des saccades afin d'accentuer la possibilité d'en observer les conséquences perceptives. Ce paradigme est d'autant plus pertinent pour notre hypothèse puisque l'adaptation saccadique induit des changements perceptifs (ex : d'un point de vue spatial, entraîne des modifications de la localisation de cibles, voir section 4.3.3).

Pour l'**Article 4** et l'**Etude 5**, les participants étaient répartis en deux groupes expérimentaux, nous permettant d'explorer les changements perceptifs consécutifs aux (1) variations naturelles de l'amplitude des saccades dans un groupe sans adaptation saccadique (**Article 4**) et (2) aux changements moteurs induits par adaptation saccadique (**Article 4** et **Etude 5**). Dans l'**Article 4**, les participants devaient juger si un disque de taille variable, présenté avant la saccade en périphérie, était plus grand ou plus petit qu'un second disque de taille fixe, présenté après la saccade en zone fovéale. Dans l'**Etude 5**, ils devaient d'abord juger si le premier disque présenté en fovéa pendant 300 millisecondes était présenté pendant plus longtemps que le second disque de durée variable présenté en périphérie, puis ensuite effectuer une saccade vers une cible saccadique. Ces deux expériences étaient composées de trois phases. La phase initiale correspondait à une phase dans laquelle la cible saccadique était toujours présentée à 12 degrés à droite d'une croix de fixation. Dans

la seconde phase, la cible saccadique se déplaçait progressivement de 1 à 3° (pendant la saccade) en direction opposée à celle de la saccade afin d'induire une adaptation saccadique en diminution d'amplitude. Le saut intra-saccadique était maintenu à 3° dans la phase finale une fois l'adaptation saccadique mise en place. Pour le groupe sans adaptation, la position de la cible restait à la même position (12°) dans les trois phases de l'expérience. La latence, l'amplitude et la durée des saccades ont été enregistrées.

En accord avec nos hypothèses, les résultats de l'**Article 4** ont montré que la taille perçue varie suite à des changements d'amplitude induits artificiellement par la méthode du double-saut de cible (adaptation saccadique), mais plus simplement qu'elle varie avec la variabilité inhérente aux saccades (même sans adaptation saccadique). Des saccades de plus petites amplitudes sont associées avec une taille perçue plus petite que celle perçue avec des saccades de plus grandes amplitudes. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle la magnitude motrice impacte directement la magnitude perçue de la taille physique d'un objet. Les résultats de l'**Etude 5** sont quant à eux des résultats préliminaires. Ces premiers résultats ne montrent pas d'effet de la modification de l'amplitude sur la perception des durées.

2.1 Article 4 – Saccadic adaptation shapes perceived size: Common codes for action and perception.

Pressigout, A., Paeye, C., & Dore-Mazars, K. (in revision). Saccadic adaptation shapes perceived size: Common codes for action and perception. Attention, Perception, & Psychophysics. PP-ORIG-19-107

RESUME

Le modèle ATOM (Walsh, 2003) propose que le traitement de magnitudes perceptives, telles que l'espace, le temps et les quantités, impacte les paramètres moteurs d'un mouvement. Une autre prédiction du modèle est que le changement de magnitude d'une dimension perceptive entraîne la perception d'un changement dans le même sens de la magnitude d'une autre dimension perceptive (« more A – more B »). Si le système perceptif et le système moteur sont tous deux intrinsèquement liés par un système de magnitude, la question se pose des conséquences de l'action sur la perception. La présente étude avait pour but de déterminer si les variations d'amplitude inhérentes à la saccade ou renforcées par l'induction d'une adaptation saccadique en diminution d'amplitude sont susceptibles de modifier la taille perçue d'un objet. L'adaptation saccadique est un mécanisme observé en laboratoire qui modifie l'amplitude des saccades en réponse au changement répétitif des coordonnées visuelles de la cible pendant la saccade (i.e. protocole du double saut de cible de McLaughlin, 1967). L'adaptation saccadique est déjà connue pour entraîner des distorsions de l'espace comme des erreurs de localisation d'une cible visuelle (voir Zimmermann & Lappe, 2016, pour une revue). Dans notre étude, les participants devaient effectuer une tâche perceptive conjointement à une tâche saccadique. Ils devaient juger si, le rond de taille variable présenté 600 ms en périphérie avant la saccade, était perçu plus grand ou plus petit que le rond étalon présenté en fovéa à l'arrivée de la saccade. Une adaptation saccadique en diminution d'amplitude a été induite pour la moitié des participants. Lorsqu'aucune adaptation saccadique n'était mise en place, l'estimation de la taille d'un objet était plus petite/grande pour des saccades de plus courtes/grandes amplitudes respectivement. Cet effet a été accentué pour le groupe dans lequel l'adaptation saccadique a été mise en place, ce qui confirme l'hypothèse « more A – more B » d'ATOM (Walsh, 2003) jusqu'alors proposée pour les interactions entre les seules dimensions perceptives. Nos résultats élargissent le modèle ATOM en montrant une influence de l'action sur la perception et sont en faveur de l'idée que les paramètres moteurs influencent la perception de propriétés des objets autres que leur localisation dans l'espace. Enfin, cela suggère que les magnitudes motrices peuvent être traitées par un système de magnitude commun pour la perception et l'action.

Saccadic adaptation shapes perceived size: Common codes for action and perception.

Version révisée du manuscrit n° PP-ORIG-19-107 soumis à Attention, Perception, & Psychophysics

Pressigout, A., Paeye, C. & Dore-Mazars, K.

Université de Paris, VAC, F-92100 Boulogne-Billancourt, France

Alexandra Pressigout
Email address: alexandra.pressigout@parisdescartes.fr
Tel.: +33 (0)1 76 53 29 44

Abstract

The Theory of Magnitude (Walsh, 2003) proposed that processing spatial, numerical and temporal information impacts motor parameters of action, suggesting that perceptual and motor systems share common codes. The model predicts that the modification in one of these domains should impact another domain in the same direction. The aim of the present study was to test whether saccade amplitude variations inherent to saccadic eye movements (no-adaptation group) or induced by backward saccadic adaptation (adaptation group) affect object size perception. Indeed, perceived object location is known to be correlated with motor changes induced by saccadic adaptation in the oculomotor system. One half of the participants only was assigned to a saccadic backward adaptation, that was obtained by stepping the saccadic target (i.e. a cross) towards the fixation during saccades, which decreased movement amplitudes. All participants had to compare the size of a test disk presented at the saccadic target location with the size of a standard disk presented in fovea after the saccade. Analyses revealed that saccades characterized by a small amplitude lead to a smaller perceived object size compared to saccades characterized by a large amplitude. Interestingly, such a result was found for the group who did not experience saccadic adaptation and was emphasized for the adaptation group. Our conclusions suggest that saccadic amplitude variations (natural or enforced by saccadic adaptation) affect object size perception. Theoretical implications of the strong links between oculomotor parameters and object perception are discussed.

Introduction

Motor and perceptual representations determine the way we interact with the world (Markman & Brendl, 2005). These interactions require the integration of different types of magnitude such as spatial, temporal and numerical ones. The estimation of 'how long', 'how many times', 'how much' is vital for some decisions in our daily life (when crossing the road or grasping an object for instance). A large number of studies shows a great interest for the idea that perceived time, space and number interact and share properties. The theory of magnitude (ATOM, Walsh, 2003) proposed that these dimensions are processed by a generalized magnitude system supposed to compute the magnitude according a common metric (Winter, Marghetis & Matlock, 2015). The system is not restricted to these three dimensions since it can be extended for the processing of other perceptual dimensions such as size, luminance or loudness, all dimensions which can be represented along a continuous scale of increasing or decreasing magnitudes ('more' or 'less'). Moreover, this model predicts that any modification in one dimension should impact the perceived magnitude of other dimensions in the same way, a prediction which has been supported by behavioral studies (e.g. DeLong, 1981; Xuan, Zhang, He & Chen, 2007). For instance, increasing numerosity, luminance or size of a stimulus leaded to an increase in the perceived duration of this stimulus, which suggested that these magnitudes interfered (Xuan, Zhang, He & Chen, 2007). The Size-Congruency effect (Cohen Kadosh, et al., 2007; Henik & Tzelgov, 1982) is also an example of interactions between the processing of physical size (its font) of a number and its numerical size. When participants have to judge which of two numbers is numerically larger, the physical size of numbers may interfere with the numerical comparison. Participants responses are faster for congruent conditions (e.g. small numbers presented in small font size) and slower for incongruent conditions (e.g. small numbers presented in large font size). Such interference, observed on reaction times, suggests that the physical size affects numerical processing.

In the ATOM model, the role of perceptual magnitudes is to guide action. Obviously, grasping an object requires integrating its size information. Some studies on hand or eye movements have reported an impact of the magnitude information on the movement parameters. It should be noted that ATOM is concerned by the immediate sensorimotor consequences of perceptual magnitudes, specializing in the study of short time movement. For instance, number magnitude has been shown to affect pointing (Fischer 2003, Hesse, Fiehler & Bremmer, 2016), swiping (Dotan & Dehaene, 2013; Fischer, Fischer, Huber, Strauß & Moeller, 2018), and grasping movements (Andres, Olivier & Badets, 2008; Lindemann, Abolafia, Girardi & Bekkering, 2007). In Fischer et al.'s study (2018), participants had to swipe an object to the left or to the right following the presentation of a number. The authors found that small/large magnitudes are processed faster when associated with left/right space respectively. Moreover, movement amplitude increased with number magnitude. Such an interaction between space and quantity on motor properties have been mainly observed for manual reaction times (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993; Ren, Nicholls, Ma & Chen, 2011; Seegelke & Wühr, 2017; Wühr and &

Seegelke, 2018) but also for oculomotor responses (Fischer, Warlop, Hill & Fias, 2004; Schwarz & Keus, 2004; Myachykov, Cangelosi, Ellis & Fischer, 2015; Pressigout, Mersad, Charvillat & Doré-Mazars, 2018). These studies support the claim that both action planning and action execution are influenced by different perceptual magnitudes. All these behavioral data are compatible with ATOM, which assumes that motor outputs reflect interactions between different perceptual dimensions. At the neurological level, the perceptual system is directly linked to the motor one in the parietal cortex (Bueti & Walsh, 2009; Culham & Valyear, 2006; Piazza & Eger, 2016). Therefore, if the magnitude of a perceptual dimension affects the magnitude of motor parameters, one may wonder whether changes in a motor system could affect perception. If so, a generalized system such as ATOM should encompass both perceptual and motor magnitudes which should mutually influence each other rather than positing a unilateral impact of perceptual magnitudes on movement planning and/or execution.

Indeed, several lines of research emphasize the close link between perception and action (e.g. Prinz, 1990; Creem-Regehr & Kunz, 2010): for instance, ideomotor theories state that action is inherently related to its perceivable effects (see Shin, Proctor & Capaldi, 2010 for a review). According to the Theory of Event Coding, action and perception codes share a common representational system (Hommel, Müsseler, Aschersleben & Prinz, 2001; Herwig, 2015). These authors assume bidirectional influences between perception and action planning or execution. In the visuomotor domain, O'Regan and Noë (2001) proposed that perception cannot be understood outside the knowledge of the sensorimotor contingencies between eye movements and changes in the retinal input. Interestingly, Burr and colleagues (Burr, Ross, Binda & Morrone, 2011) have already investigated the issue of a common metric for perception and ocular saccades (rapid shifts in gaze direction bringing the image of an object on the fovea). They briefly flashed a stimulus around the time of saccade and observed errors in stimulus localization in the direction of the saccadic target (Burr et al., 2011, see also Ross, Burr & Morrone, 1996). This type of error, due to an underestimation of the distance between stimulus and target, is termed "saccadic compression" of visual space. A similar phenomenon has also been reported for time (Binda, Cicchini, Burr & Morrone, 2009) and number (Binda, Morrone, Ross & Burr, 2011) dimensions. Such findings suggest that generating a saccade influences the three perceptual dimensions in the same way, but they do not prove however that modifying the magnitude of action parameters (e.g. accelerating or slowing down, shortening or lengthening saccades) impacts the perception of spatial, temporal and numerical information similarly. The main goal of our study was to test whether variations in saccade amplitude would modulate perceived object size. To test this, we took advantage of the natural variations of saccade amplitude observed when participants make saccades towards small targets. According to the ATOM model, one could expect that smaller/larger saccade amplitudes would lead to an under/over-estimation in an object perceived size.

It is well known that saccades toward a small target tend to be hypometric (i.e. eyes undershoot the target), by around 5-10% (Becker, 1989). In order to increase the range of variations in saccade amplitude, one possibility is to induce the saccadic system to artificially change saccadic amplitude.

The saccadic adaptation mechanism is known to modify saccade amplitude by recalibrating the visuo-motor system in response to targeting errors. The double-step paradigm introduced by McLaughlin in 1967 consists in jumping the saccadic target during the saccade so that the eye lands away from the new target position. Since visual acuity is drastically reduced during saccade execution (Bridgeman, Hendry, & Stark, 1975; Klingenhoefer & Bremmer, 2011), the target step is generally not perceived. After several repetitions (e.g. within 30-60 trials, Deubel, Wolf & Hauske, 1986) the distance between the new target position and the saccade endpoint is progressively reduced by the oculomotor system so that the eyes land closer and closer to the new target position. This phenomenon manifests itself through longer or shorter saccadic amplitude depending on the direction (forward or backward) of repeated intra-saccadic target steps. The use of saccadic adaptation to reduce saccade amplitude is particularly interesting since it is known that such motor changes induce modifications in object localization (e.g., Collins, Doré-Mazars & Lappe, 2007; Zimmerman & Lappe, 2010, see Zimmerman & Lappe, 2016, for review). More precisely, when participants had to localize a visual object presented in the target vicinity prior to initiating an adapted saccade, objects were mislocalized in the direction of adaptation. Recently, Bosco, Lappe and Fattori (2015) obtained intriguing results when increasing or decreasing the length of a visual target during saccades: this manipulation induced saccadic adaptation in the direction of object size modification – probably due to the shift of the stimulus gravity center. Bosco el al. (2015) found that perceived object size, estimated through grip aperture and verbal report, was affected in the same direction: saccade amplitude and size estimation became smaller (or larger) when the post-saccadic object length was decreased (or increased). According to the authors, the changes in size perception would result from saccadic adaptation, the later being due to the intra-saccadic modifications of object length. However, it cannot be ruled out that the perceived size was affected only by the intra-saccadic change in object size. Indeed, this possibility is consistent with the study of Valsecchi and Gegenfurtner (2016) who found a recalibration of perceived size (but no modification of saccadic amplitudes) after systematically increasing or decreasing saccade target size during eye movements.

The present study

In order to test specifically whether motor parameters such as saccadic amplitude influence perception, we measured the perceived size of a visual target as a function of saccade amplitude differences resulting from (1) natural variations and (2) motor recalibration induced by saccadic adaptation. Participants were asked to perform two embedded saccadic and perceptual tasks. Before the saccade, a test disk varying in size was presented in the periphery. The disk was then replaced by a cross which signaled to the participants that they had to make a saccade. After the eye movement, a reference disk of constant size was displayed foveally, and participants had to judge whether it was larger (or not) than the test disk. The saccadic target remained stationary during saccades for the no-adaptation group

whereas it was progressively displaced during saccades throughout the experiment to induce a backward adaptation in the saccadic adaptation group

Discrimination performance was assessed via psychometric functions obtained (1) for small and large amplitudes and (2) before and after backward saccadic adaptation. We then compared the points of subjective equality [PSEs], defined as the size of the test (variable) disk that judged by the observer to be equal to the reference disk.

If the magnitude of saccadic parameters is processed by a general system along the same continuous scale as other - perceptual - magnitudes, perceived object size should change in the same direction as saccade amplitudes. That is, perceived size should be smaller (larger) after the shortest (longest) saccades. Moreover, compared to naturally hypometric saccades, backward saccadic adaptation should induce a further decrease in perceived size.

Method

Participants

Forty-two healthy participants, mostly students of Paris Descartes University, volunteered for the experiment (30 females, mean age: 24). All had normal or corrected-to-normal vision and none reported any mental or neurological disorder. They were naïve about the purpose of the study and signed an informed consent before the experiment. Twenty-eight participants were right-handed (according to the Edinburgh Handedness Inventory, Oldfield, 1971). Among the participants, twenty were allocated to the no-adaptation group while the other ones performed the saccadic adaptation. Procedures were in line with the declaration of Helsinki and were approved by the local committee of Paris Descartes University (N° CER-PD: 2018-62).

Stimuli and material

Participants were seated in a dimly lit room at 57 cm from a screen, with their head on a chin rest and head restraint. The stimuli, generated with the Psychophysics Toolbox for Matlab (Brainard & Vision, 1997; Pelli, 1997), were displayed on a 24.5 inches BENQ screen (ZOWIE XL-2540), with a refresh rate of 144 Hz and a spatial resolution of 1920x1080. They were displayed on a grey screen (luminance 17 cd/m²). The reference (foveal) stimulus was a black disk whose contours were blurred by a cumulative Gaussian gradient covering covering 20% of the 1.8° diameter (equally distributed on each side). We presented nine different test disks whose area was a ratio of the reference disk. There were two extreme (0.4 and 1.6) and seven intermediate ratios (0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3). A black cross (0.7° * 0.7°, line width 2 pixels) was used as fixation point as well as saccadic target. Eye movements were recorded with an EyeLink® 1000 (SR Research, Ontario CA) sampling at 1000 Hz and with a spatial resolution of 0.05°.

Procedure and design

The experiment was composed of three phases, each of them including 184 trials: the two extreme ratios were presented eight times while the seven intermediate ratios were presented 24 times. In the first and third phases, participants performed the saccadic task and the perceptual task while in the second phase, only the saccadic task was performed. The experiment, which lasted about 90 minutes, began with 18 practice trials followed by 552 test trials. Each phase started with a calibration procedure during which subjects had to track a point successively presented at nine different locations around the screen. Fixation was checked automatically at the beginning of each trial: gaze had to be inside an invisible window of 1.5°x1.5° centered on the fixation cross for a trial to be started.

Trial description

The task design is illustrated in Figure 1. Each trial of the first and third phases began with a fixation cross displayed between 4 and 7° to the left from the center of the screen. After a random delay (500 to 700 ms), the test disk appeared at 12° to the right of the fixation cross that participants were instructed to keep on fixating (Fig.1, frame 1). After 600 ms, the fixation cross disappeared and the test disk was replaced by a target cross (Fig.1, frame 2). Subjects had then to execute their saccade toward this target only when its appearance coincided with the disappearance of the fixation cross. If saccade onset was detected before the extinction of the fixation cross or if saccade latency exceeded 800 ms, the trial was aborted and presented again later on. After saccade detection, the target cross was displayed for 300 ms (Fig.1, frame 3), followed by a 100-ms empty screen. Finally, the reference disk was displayed at the saccade target location for 600 ms (Fig.1, frame 5). After the extinction of this reference disk, participants could make their perceptual judgment by indicating whether the second disk was larger (press on the up-arrow key) or not (press on the down arrow key) than the first one. 500 ms after the response, a new fixation cross signaled the beginning of the next trial. In the second phase, the time course of the trials was the same, except that the second reference disk was not displayed, so that participants of both groups performed only the saccadic task.

Unlike for the no-adaptation group in which the target was not shifted during saccades (the post-saccadic target eccentricity was 12°), the double-step paradigm was used for the saccadic adaptation group. The initial phase (pre-adaptation) proceeded similarly as for the no-adaptation group. In the second (adaptation) and third (end-adaptation) phases, the saccadic target, initially presented 12° to the right of the fixation cross, was shifted toward the fixation cross as soon as a saccade was detected. In the second phase, the target stepped by 1° in the first 46 trials, 2° in the next 46 trials and 3° in the 92 remaining trials. Throughout the third phase, the target always stepped by 3°, leading to a constant post-saccadic target eccentricity of 9°.

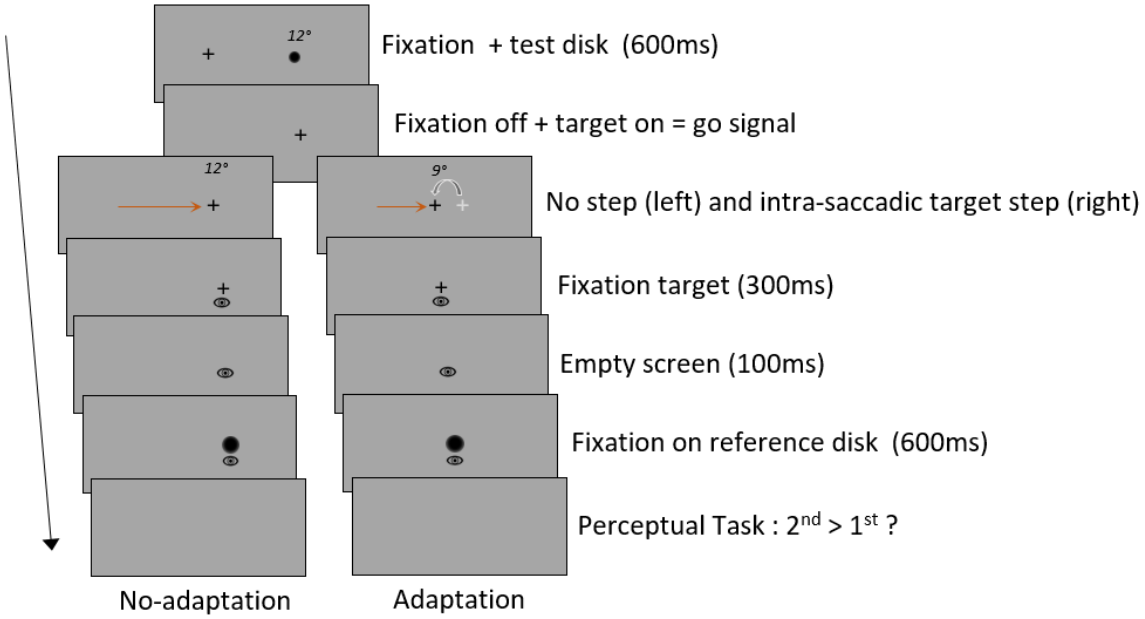

Figure 1. *Structure of a trial in Phase 3. A test disk (varying in size) was first presented at a 12° eccentricity. As soon as this disk was replaced with a cross, participants made a saccade toward this cross, which was intrasaccadically shifted to 9° (the pre-saccadic target position is materialized by the grey cross) in the backward adaptation group. Finally, participants compared the test and the reference disks and made their judgment with a manual response. Phase 1 was similar to Phase 3 except that no target shift occurred during saccades. Phase 2 was similar to Phase 3 without the perceptual task.*

Data analysis

We recorded saccade latency, saccade amplitude, and the frequency of 'YES' responses for each ratio. Latency was defined as the delay (in ms) between target appearance and saccade onset. Amplitude (in degrees) is the distance covered by the eyes to reach the target. In offline analyses, we used the Eyelink parser to identify saccade onset and offset (velocity threshold: 30°/s, acceleration threshold: 8000°/s^2). Psychometric functions were parametrically fitted using the Quickpsy R Package (Linares & López-Moliner, 2016). We plotted the proportion of trials in which the test disk was judged larger than the reference disk and estimated fit parameters (PSE and 95% confidence interval) with the maximum likelihood method. To estimate the discrimination sensitivity of each participant, we computed the Just Noticeable Difference (JND) from the psychometric function. This parameter, related to the function steepness, defines the smallest difference perceived between two stimuli. The JND was calculated as follow: JND = ($x_{.75}$ - $x_{.25}$)/2, with $x_{.75}$ and $x_{.25}$ the ratios of the test disk at which the probability to respond 'YES' (test disk judged larger than the reference disk) was 75% and 25%, respectively. To assess the amount of saccadic adaptation, we computed a percent change in amplitude change for each participant as follow:

$$\text{Percent change in amplitude} = ((\text{Amplitude}_{\text{first}} - \text{Amplitude}_{\text{third}})/\text{Amplitude}_{\text{first}}) * 100$$

A similar formula was used to compute individual percent change in PSE:

$$\text{Percent change in PSE} = ((PSE_{first} - PSE_{third})/PSE_{first}) * 100$$

Mixed analyses of variance were run on saccade latencies, amplitudes, JND and PSE, with Group (backward adaptation vs. no-adaptation) as a between-subject factor and Phase (first vs. third) as a within-subject factor. Tukey's post-hoc were used to perform specific comparisons. To test whether saccade amplitudes impact size perception, amplitudes were rank-ordered mixing trials from phase 1 and 3 in both groups. Psychometric functions were fitted for saccades amplitudes in the first (i.e. the smallest) and the fourth (i.e. the largest) quartiles. The difference between the two obtained psychometric functions for small and large amplitude in each group was then tested using a boostrap method comparison of the Quickpsy R Package (Linares & López-Moliner, 2016, p125).

Saccades landing more than 5° away from the post-saccadic target were excluded from analyses (5% and 3% of the data in the backward adaptation and no- adaptation groups, respectively). After discarding saccades with latencies shorter than 80 milliseconds (9% and 10% in the backward adaptation and no- adaptation groups), we removed latency outliers (3% of the data in each group) based on Tukey's rule (Carling, 2000). Overall, 17% and 16% of the data were discarded in the backward adaptation and no- adaptation groups, respectively.

Results

Requirements

Primary analyses were conducted in order to verify that latencies and task difficulty remained stable over the experiment (between the first and third phases) and did not vary between groups. Mean saccade latencies (Table 1) were not affected by Group [$F(1,40)=1.63$, $p=0.21$]. The ANOVA revealed a significant main effect of Phase, with latencies decreasing between the first and the third one, which might reflect a training effect [$F(1,40)=50.16$, $p<0.001$]. The interaction was not significant [$F(1,40)=1.46$, $p=0.23$]. At the perceptual level, individual discrimination performance was defined by the just noticeable difference (JND, see Table 1). This measure, negatively correlated with individual sensitivity, provides an estimation of task difficulty for each subject. Mean JNDs were similar in the two groups: both had a mean JND of 0.11 (±0.05) in the first phase and of 0.10 (±0.04) in the third phase. The main effect of Phase was significant [$F(1,40)=6.30$, $p=0.02$], indicating a very slight increase of 0.01 ratio in discrimination performance. The interaction between Phase and Group was close to significance [$F(1,40)=0.09$, $p=0.08$] but Tukey's post-hoc did not revealed any differences between conditions [all $p>0.23$].

Then, analyses on mean saccade amplitudes were conducted to ensure 1) that the mean amplitude did not change between the first and third phases in the no- adaptation group and 2) that backward saccadic adaptation was successfully induced in the other group. For mean saccade amplitudes, the ANOVA revealed main effects of Group [$F(1,40)=50.8$, $p<0.001$] and Phase [$F(1,40)=331.7$,

$p<0.001$], as well as a significant interaction [$F(1,40)=438$, $p<0.001$]. Tukey's post-hoc revealed that the mean amplitude in Phase 3 in the backward adaptation group significantly differed from the other conditions [$p<0.001$]. Importantly for our purpose, no difference between groups in saccade amplitude was observed in the first phase [$p=0.66$]. As expected, all participants in the backward adaptation group showed a consistent decrease in saccade amplitude. Their mean percent change in amplitude, which significantly differed from zero [$t(21)=25.45$, $p<0.001$], was 18.50± 3.33%, with a minimum of 10.14% and a maximum of 23.82%. Note that the target step from 12° to 9° represents a 25% shift from the initial target eccentricity. While saccade amplitudes were remained constant across time in the no- adaptation group, they significantly decreased as expected in the step-group.

To ensure that the size of the test disk presented before the saccadic target was not part of the saccade planning, Ratio (0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3) was added as within-subject factor in a new analysis of variance. This ANOVA showed no effect of Ratio on saccade amplitude [$F(8,319)=0.82$, $p=0.58$] nor interaction with the group factor [$F(8,319)=0.18$, $p=0.99$].

	No-adaptation group		**Adaptation group**	
	1st Phase	***3rd Phase***	***1st Phase***	***3rd Phase***
Latency (ms)	259 ±74	218 ±44	235 ±97	205 ±40
Amplitude (°)	11.68 ±0.5	11.89 ±0.5	11.85 ±0.5	9.66 ±0.5
JND	0.11 ±0.05	0.10 ±0.04	0.11 ±0.05	0.10 ±0.04
PSE	0.988 ±0.1	0.997 ±0.1	0.942 ±0.1	0.981 ±0.1

Table 1. *Means ± standard deviations of saccade amplitudes, latencies, JNDs and PSEs for both groups and phases.*

Does size perception depend on saccade amplitude?

First, we assessed whether natural variations in saccade amplitudes could influence size perception. For each group, regardless the phase, two ranges of saccade amplitude were built: saccade amplitudes below the first quartile of the mean saccade amplitude ("smallest amplitudes") and those above the fourth quartile ("largest amplitudes"). Therefore, two psychometric functions were obtained for each range of saccade amplitude in each group. Table 2 presents the mean PSEs calculated for both groups and amplitude sizes (smallest *vs.* largest). If saccade amplitude affects size perception, i.e. if a decrease in saccade amplitude induces a decrease in perceived size), the mean PSE should be higher for the smallest saccade amplitudes than for the largest ones.

	No-adaptation group		**Adaptation group**	
	Smallest Amp	***Largest Amp***	***Smallest Amp***	***Largest Amp***
Amplitude °	10.50 ±0.88	12.92 ±0.44	8.82 ±0.82	12.58 ±0.52
PSEs *[Conf. Int.]*	1.014 [0.998-1.025]	0.983 [0.968-0.996]	0.994 [0.968-0.996]	0.936 [0.968-0.996]

Table 2. *Means ± standard deviations of saccade amplitudes and PSEs as a function of Group (No-adaptation vs. Adaptation) and Amplitude size (small vs. large). Conf. Int., Confidence Interval.*

In the no-adaptation group, the difference in PSEs obtained from the distributions of smallest *vs.* largest saccade amplitudes was significant [**Δ=-0.031**, IC[-0.049;-0.0048], $p<0.05$]. As expected, the PSE is larger for the largest saccade amplitudes. In the adaptation group, the obtained difference in PSEs between the smallest and the largest saccade amplitudes was also significant [**Δ=-0.058**, IC[-0.058;-0.075], $p<0.05$].

Then we tested whether saccadic adaptation affects size perception. Since the amplitude was progressively reduced during the experiment, one could expect an increase in PSE between the first and third phases. Such an increase would mean that the test disk had to be larger than the reference one to be perceived as equal. The ANOVA revealed no main effect of Group [$F(1,40)=0.89$, $p=0.35$] but a main effect of Phase [$F(1,40)=7,61$, $p=0.008$]: mean PSE increased from the first to the third phase as shown in Table 1. Critically, the interaction between those two factors did not reach significance [$F(1,40)=2.80$, $p=0.1$], suggesting a similar increase in PSE in both groups. Such a result is surprising as we did not expect any difference in PSE (between the first and the third phase) in the no-adaptation group. Indeed, no difference in amplitude was found between the first and the third phase in this group. Nevertheless, inspection of post-hoc analyses could be informative for our purpose (see Hsu, 1996, p177 for justifying multiple comparisons even for non-significant interaction). The difference in mean PSE between the first and the third phases was significant in the backward adaptation group [$p=0.016$], unlike in the no-adaptation group for which the difference were not significant [$p>0.37$]. These multiple comparisons suggested that the main effect of Phase was probably due to the significant increase in PSE in the backward adaptation group. The psychometric functions for one representative participant of the backward adaptation group are presented in Figure 2 (left panel). A rightward shift of the psychometric function is visible in the third phase. This increase in PSE is reflected in a negative percent change in PSE (-7.22% for this subject; -4.41 ± 5.98% on average for the group). The right panel of Figure 2 shows the perceptual performance of one representative participant of the no-adaptation group. No shift of the psychometric function was observed in the third phase (the corresponding percent change in PSE was 1.92%). The percent change in PSE in the no- adaptation group was -1.16 ± 6.80%, supporting the idea that the perceptual change observed in the backward adaptation group was due to saccadic adaptation.

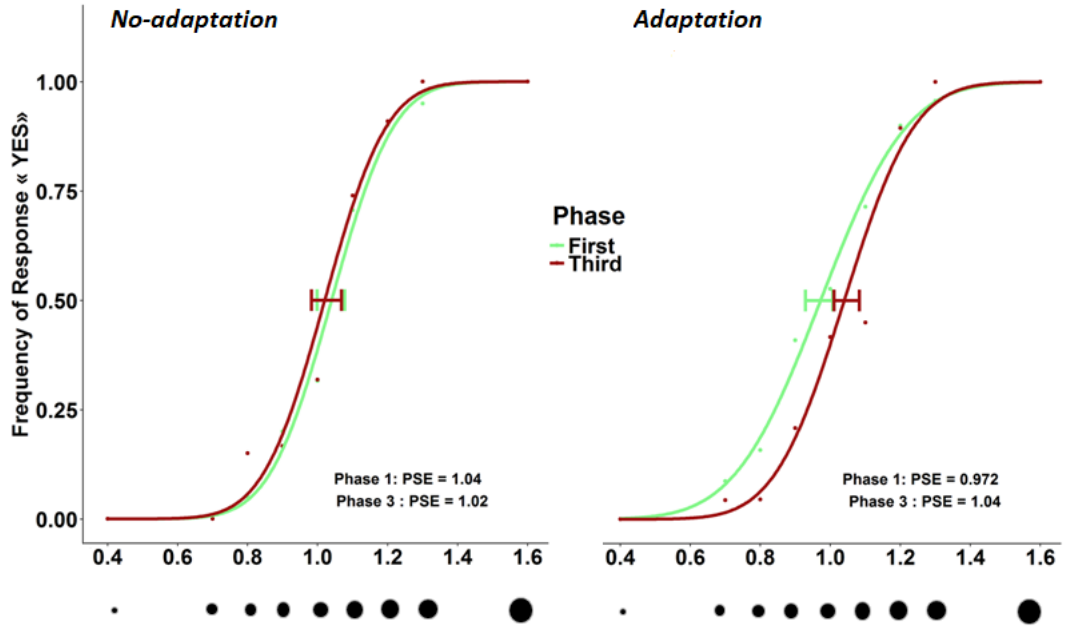

Figure 2. *Examples of individual psychometric functions in the first (green) and third (red) phases, obtained from the backward adaptation group (left panel) and no-adaptation group (right panel). Error bars indicate 95% confidence intervals.*

To further investigate this issue, we calculated individual percent changes in PSE in each group, as we did for the percent changes in saccade amplitude. As can be seen in Figure 3, 19 out of 22 participants in the backward adaptation group displayed the expected pattern: their rate of perceptual change was negative. In the no-adaptation group, the distribution of percent change in PSE is symmetric around zero. Moreover, participants in the backward adaptation group exhibited a stronger effect than participants who did not undergo saccadic adaptation.

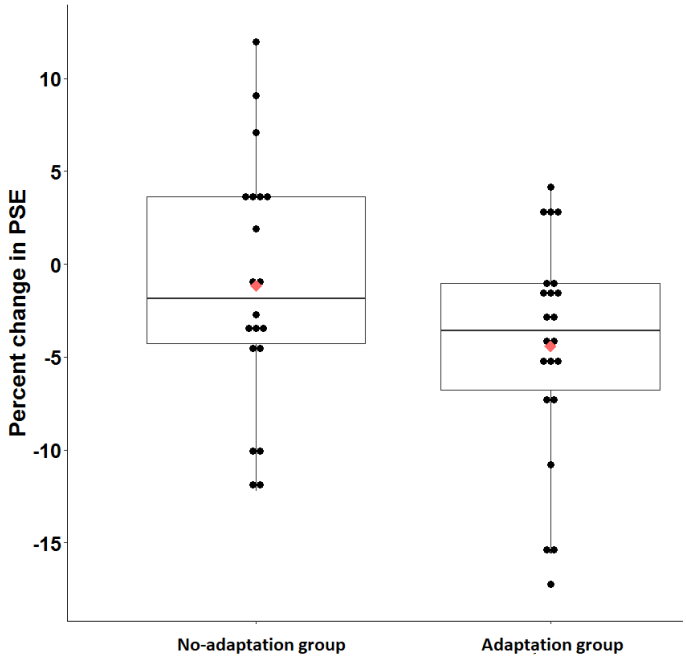

Figure 3. *Boxplots of rates of perceptual change in each Group. Diamonds indicate the mean of the distributions, and each point represents one participant. A negative value corresponds to an increase in PSE from Phase 1 to Phase 3, meaning that in comparison with the baseline, the size of the test disk was underestimated after backward saccadic adaptation.*

Discussion

The goal of the present study was to examine whether object size perception varies with saccade amplitudes. Beyond the analysis of natural variations of saccade amplitudes, our study takes advantage of the saccadic system plasticity to further reduce saccade amplitude. Half of participants performed a condition without saccadic adaptation and the other half performed a condition in which backward saccadic adaptation was induced by the double-step paradigm (McLaughlin, 1967). The distribution of saccade amplitudes in each group were split-off in order to compare the smallest and the largest amplitudes. Results revealed that the PSE was smaller for the smallest saccade amplitudes than for the largest saccade ones. This is a first argument that indicates an impact of saccade amplitude variations on size perception. Such an effect has been magnified by means of saccadic adaptation. These results were supported by next analyses showing that PSEs increased after saccadic adaptation: compared to baseline, the size of the pre-saccadic test disk presented in the saccadic adaptation field was underestimated. Such a result is consistent with the decrease in saccade amplitude from the first to the third phase. In contrast, no change in saccade amplitudes between the first and the third phases was observed among participants in the no-adaptation group who made saccades towards a stationary target. Therefore, PSEs did not vary between these phases, indicating stable size perception throughout the experiment. Overall, the presence of an effect for participants that did not experience saccadic adaptation suggests that natural variations of saccade amplitude over trials could modulate size

perception. Reducing saccade recalibrating the saccadic system appears to emphasize the perceptual effect. One possibility could be that saccadic amplitude has induced larger difference amplitudes providing wider perceptual changes. This poses the question of a correlation between the extent of amplitude differences and the extent of perception differences. Similar findings were reported by Collins et al. (2007) who observed a shift of the perceived target location proportional to the changes in saccadic amplitude. Unfortunately, out protocol is not appropriate to test directly the correlation between saccade amplitude and size estimation, as Bosco et al. (2015) did, because the point of subjective equivalence, our estimation measure, is calculated across a large number of trials.

Our results showed that small compared to large saccade amplitudes are associated with a smaller perceived size. Such results complement the literature on the ATOM model (Walsh, 2003, Bueti & Walsh, 2009) which predicts that modifications in one perceptual dimension impacts the perception of another dimension in the same direction (i.e. more A - more B). Moreover, our findings extend studies showing that saccade generating affects numerical processing (Irwin & Thomas, 2007) as well as the perception of stimuli presented around the time of saccades (Burr et al., 2011). Since generating a saccade compresses the perceived space, time and number of visual elements (Burr et al., 2011), our study shows that the modification of saccade amplitude (i.e. a motor magnitude) impacts size perception in the same direction.

Moreover, our protocol has the advantage of disambiguating the critical dimension (target location) which is needed to aim at the target from the object feature (its size) involved in the perceptual task. In the double-step paradigm, moving the target, i.e. changing its location during saccades, induces retinal errors (the retinal eccentricity of the target when the eye lands after saccades). The system progressively compensates for them by recalibrating its motor commands (Hopp & Fuchs, 2004; Pélisson, Alahyane, Panouillères & Tilikete, 2010). These motor changes might be accompanied by changes in spatial maps, as indicated by the shift of perceived objects' location in the direction of saccadic adaptation (Collins & Doré-Mazars, 2007, Zimmerman & Lappe, 2010, Garaas & Pompluns, 2011, see Zimerman & Lappe, 2016, for a recent review). Note that in these studies, the perceptual test measured spatial localization. In another recent study, Bosco et al. (2015) induced saccadic adaptation via a change in the size of the visual target during saccades. They observed a distortion in perceived size that they attributed to the motor change. In this size-based adaptation, object size was a critical parameter for participants to aim at the target, whereas such information is less relevant for classic double-step adaptation. A common feature of these studies is the finding of a change in the perception of the dimension relevant for saccade programming, whereas in our experiment, the visuomotor system seems to use target localization to determine saccade amplitude and object size to perform the perceptual task. To avoid potential effects related to the size of the test disk presented before saccades, his object was replaced by a different saccadic target (a cross) that was stepped during saccades. Analyses have shown that the size of the test disk did not impact saccade amplitude. Even if participants planned their saccade during the presentation of the target disk, its size variations did not

take part of the saccade planning process. Therefore, our study is the first one to provide evidence that motor change (i.e. re-calibrating saccade amplitude), not induced by an intra-saccadic change of the visual probe as in Bosco et al. (2015)'s experiment, leads to modification in size perception.

An alternative hypothesis would have been that saccadic adaptation leads to modifications in targets perceived coordinates, as showed in previous experiments (e.g., Collins et al., 2007; Zimmerman & Lappe, 2010). In that case, the test disk (presented before the saccadic target) would appear closer to the fixation point. It is known that the perceived size of a stimulus decreases with its eccentricity in periphery (Bedell & Johnson, 1984; Baldwin, Burleigh, Pepperell & Ruta, 2016; Newsome, 1972). If the target is perceived closer, its perceived size would increase for participants who experienced saccadic adaptation, compared to participants who did not experience it. Our results invalidate this hypothesis and instead confirm the ATOM hypothesis which seems more compatible. They corroborate the view that saccade amplitude variations have a direct effect on visual perception since natural variations of saccade amplitudes can modify the perceived object size. Moreover, saccadic adaptation induced by the target step that artificially reduced the saccades is an interesting way to observe variations in size perception. More broadly, our study supports the idea of a common metric for action and perception and confirms the prediction of ATOM whereby the decrease in one domain involves the decrease in another domain. Moreover, the model is especially concerned by the sensorimotor consequences of magnitude processing. Therefore, our study highlights that action is not merely an output of the model, but rather one of the dimensions processed by the general system of magnitude hitherto mostly reserved to perceptual dimensions.

Moreover, a number of behavioral and neurological data have provided further evidence for a common metric for magnitude processing and action control. For instance, Irwin and Thomas (2007) showed that saccades interfere with perceptual tasks involving the dorsal stream. In their protocol, participants had to perform either a parity or a magnitude comparison task while making saccades at different eccentricities. They found that only reaction times in the magnitude comparison task depended on saccade amplitude. This task is known to rely on the dorsal stream and especially on the right parietal cortex (Dehaene, 1996, Pinel, Dehaene, Riviere & LeBihan, 2001, Fias, Lammertyn, Reynvoet, Dupont & Orban, 2003), while the parity judgment task rather tends to rely on verbal processing in the ventral stream (Irwin & Thomas, 2007). Besides, it has been shown that neural areas involved in the processing of quantities and in action control overlap in parietal brain regions (Bueti & Walsh, 2009). Specifically, the intra-parietal sulcus (IPS) and the prefrontal cortex of primates are involved in the processing of numerical, spatial and temporal information (Duhamel, Colby & Goldberg, 1998) as well as in sensorimotor transformations (Gallivan & Culham, 2015). The intra-parietal region is also known for its role in both saccade programming and physical space processing (Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan, & Dehaene, 2002; Knops, Thirion, Hubbard, Michel & Dehaene, 2009). Interestingly, specific activation has been recently observed in the parietal cortex during saccadic adaptation (Gerardin, Miquée, Urquizar & Pélission, 2012; Panouillères, Habchi et al., 2012;

Panouillères, Neggers et al., 2012; Guillaume, Fuller, Srimal & Curtis, 2018; Pélission, Habchi, Panouillères, Hernoux & Farné, 2018). This overlap in the parietal lobe might explain the interference we observed between saccadic adaptation and size perception.

In summary, we showed that natural motor variations influence object size perception: decreasing saccade amplitudes induces a decrease in the perceived size of a visual object presented at the saccade target location. Such an effect is emphasized when saccade amplitudes were reduced using the saccadic adaptation protocol. The present study thus makes clear for the first time that action is an integral part of the magnitudes processed by the general system of magnitude proposed by Walsh (2003). It provides further evidence for two-way influences between spatial and motor maps and suggests the existence of common neural codes for action and perception.

Acknowledgements

We warmly thank Agnès Charvillat for her help with English, and Lara Kech for her contribution to data collection.

This research received fundings from a scholarship from the Ministry of Research (AP) and a grant from the Agence Nationale pour la Recherche (ANR-18-CE28-0001) to CP.

Open practices statement

None of the data or materials for the experiments reported here is available, and the experiment was not preregistered.

References

Andres, M., Ostry, D. J., Nicol, F., & Paus, T. (2008). Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, *44*(4), 414-419.

Baldwin, J., Burleigh, A., Pepperell, R., & Ruta, N. (2016). The perceived size and shape of objects in peripheral vision. *i-Perception*, *7*(4).

Becker, W. (1989). The neurobiology of saccadic eye movements. Metrics. *Reviews of Oculomotor Research*, 3, 13–67.

Bedell, H. E., & Johnson, C. A. (1984). The perceived size of targets in the peripheral and central visual fields. *Ophthalmic and Physiological Optics*, *4*(2), 123-131.

Binda, P., Cicchini, G. M., Burr, D. C., & Morrone, M. C. (2009). Spatiotemporal distortions of visual perception at the time of saccades. *Journal of Neuroscience*, *29*(42), 13147-13157.

Binda, P., Morrone, M. C., Ross, J., & Burr, D. C. (2011). Underestimation of perceived number at the time of saccades. *Vision research*, *51*(1), 34-42.

Bosco, A., Lappe, M., & Fattori, P. (2015). Adaptation of saccades and perceived size after trans-saccadic changes of object size. *Journal of Neuroscience*, *35*(43), 14448-14456.

Brainard, D. H., & Vision, S. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial vision*, *10*, 433-436.

Bridgeman, B., Hendry, D., & Stark, L. (1975). Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movements. *Vision research*, *15*(6), 719-722.

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.

Burr, D. C., Ross, J., Binda, P., & Morrone, M. C. (2011). Saccades compress space, time, and number. In *Space, time and number in the brain* (pp. 175-186). Academic Press.

Carling, K. (2000). Resistant outlier rules and the non-Gaussian case. *Computational Statistics & Data Analysis*, *33*(3), 249-258.

Kadosh, R. C., Kadosh, K. C., 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.

Collins, T., Doré-Mazars, K., & Lappe, M. (2007). Motor space structures perceptual space: Evidence from human saccadic adaptation. *Brain research*, *1172*, 32-39.

Creem-Regehr, S. H., & Kunz, B. R. (2010). Perception and action. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *1*(6), 800-810.

Culham, J. C., & Valyear, K. F. (2006). Human parietal cortex in action. *Current opinion in neurobiology*, *16*(2), 205-212.

Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(1), 47-68.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*(3), 371.

DeLong, A. J. (1981). Phenomenological space-time: toward an experiential relativity. *Science*, *213*(4508), 681-683.

Deubel, H., Wolf, W., & Hauske, G. (1986). Adaptive gain control of saccadic eye movements. *Human neurobiology*, *5*(4), 245-253.

Dotan, D., & Dehaene, S. (2013). How do we convert a number into a finger trajectory?. *Cognition*, *129*(3), 512-529.

Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1998). Ventral intraparietal area of the macaque: congruent visual and somatic response properties. *Journal of neurophysiology*, *79*(1), 126-136.

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.

Fischer, M. (2003). Spatial representations in number processing—Evidence from a pointing task.Visual Cognition,10, 493–508.

Fischer, U., Fischer, M. H., Huber, S., Strauß, S., & Moeller, K. (2018). The influence of number magnitude on continuous swiping movements. *Journal of Numerical Cognition*, *4*(2), 297-316.

Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L., & Fias, W. (2004). Oculomotor bias induced by number perception. *Experimental Psychology*, *51*(2), 91-97.

Gallivan, J. P., & Culham, J. C. (2015). Neural coding within human brain areas involved in actions. *Current opinion in neurobiology*, *33*, 141-149.

Garaas, T. W., & Pomplun, M. (2011). Distorted object perception following whole-field adaptation of saccadic eye movements. *Journal of vision*, *11*(1), 2-2.

Gerardin, P., Miquée, A., Urquizar, C., & Pélisson, D. (2012). Functional activation of the cerebral cortex related to sensorimotor adaptation of reactive and voluntary saccades. *Neuroimage*, *61*(4), 1100-1112.

Guillaume, A., Fuller, J. R., Srimal, R., & Curtis, C. E. (2018). Cortico-cerebellar network involved in saccade adaptation. *Journal of neurophysiology*, *120*(5), 2583-2594.

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.

Hesse, P. N., Fiehler, K., & Bremmer, F. (2016). SNARC effect in different effectors. *Perception*, *45*(1-2), 180-195.

Herwig, A. (2015). Linking perception and action by structure or process? Toward an integrative perspective. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *52*, 105-116.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and brain sciences*, *24*(5), 849-878.

Hopp, J. J., & Fuchs, A. F. (2004). The characteristics and neuronal substrate of saccadic eye movement plasticity. *Progress in neurobiology*, *72*(1), 27-53.

Irwin, D. E., & Thomas, L. E. (2007). The effect of saccades on number processing. *Perception & psychophysics*, *69*(3), 450-458.

Job, X. E., van Velzen, J., & de Fockert, J. W. (2017). Grasp preparation modulates early visual processing of size and detection of local/global stimulus features. *cortex*, *96*, 46-58.

Klingenhoefer, S. et Bremmer, F. (2011). Saccadic suppression of displacement in face of saccade adaptation. *Vision Research*, 51(8), 881-889.

Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science*, *324*(5934), 1583-1585.

Linares, D., & López i Moliner, J. (2016). Quickpsy: An R package to fit psychometric functions for multiple groups. *The R Journal, 2016, vol. 8, num. 1, p. 122-131*.

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.

Markman, A. B., & Brendl, C. M. (2005). Constraining theories of embodied cognition. *Psychological Science*, *16*(1), 6-10.

McLaughlin, S. C. (1967). Parametric adjustment in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, 2(8), 359-362.

Myachykov, A., Cangelosi, A., Ellis, R., & Fischer, M. H. (2015). The oculomotor resonance effect inspatial–numerical mapping. *Acta psychologica*, *161*, 162-169.

Newsome, L. R. (1972). Visual angle and apparent size of objects in peripheral vision. *Perception & Psychophysics*, 12(3), 300-304.

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113.

O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and brain sciences*, *24*(5), 939-973.

Panouillères, M., Habchi, O., Gerardin, P., Salemme, R., Urquizar, C., Farne, A., & Pélisson, D. (2012). A role for the parietal cortex in sensorimotor adaptation of saccades. *Cerebral Cortex*, *24*(2), 304-314.

Panouilleres, M., Neggers, S. F., Gutteling, T. P., Salemme, R., van der Stigchel, S., van der Geest, J. N., Frens, M.A. & Pelisson, D. (2012). Transcranial magnetic stimulation and motor plasticity in human lateral cerebellum: dual effect on saccadic adaptation. *Human brain mapping*, *33*(7), 1512-1525.

Pélisson, D., Alahyane, N., Panouilleres, M., & Tilikete, C. (2010). Sensorimotor adaptation of saccadic eye movements. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(8), 1103-1120.

Pélisson, D., Habchi, O., Panouillères, M. T., Hernoux, C., & Farnè, A. (2018). A cortical substrate for the long-term memory of saccadic eye movements calibration. *NeuroImage*, *179*, 348-356.

Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies, *Spatial Vision 10*:437-442.

Piazza, M., & Eger, E. (2016). Neural foundations and functional specificity of number representations. *Neuropsychologia*, 83, 257-273.

Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D., & LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage*, *14*(5), 1013-1026.

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., & Doré-Mazars, K. (2018). Time dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. *Psychological research*, 1-11.

Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In *Relationships between perception and action* (pp. 167-201). Springer, Berlin, Heidelberg.

Ren, P., Nicholls, M. E., Ma, Y. Y., & Chen, L. (2011). Size matters: non-numerical magnitude affects the spatial coding of response. *PLoS One*, *6*(8).

Ross, J., Burr, D., & Morrone, C. (1996). Suppression of the magnocellular pathway during saccades. *Behavioural brain research*, *80*(1-2), 1-8.

Seegelke, C., & Wühr, P. (2018). Compatibility between object size and response side in grasping: the left hand prefers smaller objects, the right hand prefers larger objects. *PeerJ*, *6*, e6026.

Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, *66*(4), 651-664.

Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological bulletin*, *136*(6), 943.

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.

Valsecchi, M., & Gegenfurtner, K. R. (2016). Dynamic re-calibration of perceived size in fovea and periphery through predictable size changes. *Current Biology*, *26*(1), 59-63.

Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in cognitive sciences*, *7*(11), 483-488.

Winter, B., Marghetis, T., & Matlock, T. (2015). Of magnitudes and metaphors: Explaining cognitive interactions between space, time, and number. *Cortex*, *64*, 209-224.

Wühr, P., & Seegelke, C. (2018). Compatibility between physical stimulus size and left-right responses: small is left and large is right. *Journal of Cognition*, *1*(1).

Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of vision*, *7*(10), 2-2.

Zimmermann, E., & Lappe, M. (2010). Motor signals in visual localization. *Journal of vision*, *10*(6), 2-2.

Zimmermann, E., & Lappe, M. (2016). Visual space constructed by saccade motor maps. *Frontiers in human neuroscience*, *10*, 225.

2.2 Etude 5 – l'impact de l'adaptation saccadique sur la perception temporelle

L'**Etude 5** s'est inspirée du protocole de l'**Article 4** afin de tester si des variations d'amplitude saccadique peuvent modifier la durée perçue d'un objet. Si, comme le prédit le modèle ATOM, les magnitudes de temps et de taille utilisent le même système de magnitude, les changements de taille perçue observés dans l'**Article 4** suite à des variations d'amplitude saccadique devraient s'observer de la même façon pour la magnitude temporelle. Cette étude est en cours et nous ne présenterons ici que des résultats préliminaires. Pour des raisons méthodologiques, les participants effectuent d'abord la tâche perceptive puis la tâche saccadique (voir Figure 5), contrairement à l'étude de l'Article 4 sur la taille dans laquelle les deux tâches étaient concomitantes. Les participants ont la consigne de juger lequel, du premier disque étalon, présenté pendant 300 millisecondes en vision fovéale, ou du second disque test, présenté en périphérie pendant une durée variable, a été présenté le plus longtemps. Actuellement, 6 participants ont été affectés dans un groupe dans lequel aucune adaptation saccadique n'a été induite et 15 participants ont été affectés dans un groupe où était induite une adaptation saccadique en diminution d'amplitude (protocole de double saut de la cible). L'expérience s'est déroulée également en trois phases expérimentales. La position de la cible était maintenue constante pour le groupe sans adaptation et était déplacée progressivement de 1 à 3° en direction opposée à celle de la saccade pour le groupe en diminution d'amplitude.

Les analyses préliminaires se sont tout d'abord intéressées aux variations d'amplitude entre la phase initiale et la phase finale puisqu'on observe, comme attendu, une diminution d'amplitude entre ces deux phases pour le groupe ayant subi une adaptation saccadique. Comme attendu, une telle diminution n'est pas observée pour le groupe sans adaptation saccadique pour qui la cible restait stable, indiquant une stabilité de l'amplitude saccadique au cours de l'expérience. Le Point d'Equivalence Subjectif (PES) été calculé pour chaque phase pour chacun des deux groupes. Il correspond à la durée pour laquelle le second disque a 50% de chance d'être perçu aussi longtemps que le premier disque. Les résultats montrent un effet de la phase proche du seuil de significativité mais aucune interaction entre ce facteur et le Groupe expérimental. Les PES tendent à diminuer entre la phase initiale et phase finale de façon similaire entre les groupes. Cela suggère que la durée perçue du disque test a augmenté entre la phase initiale et la phase finale. Une interprétation plus probable de ces résultats serait que la valeur du PES se rapproche de la valeur du disque étalon de 300 ms. La diminution du PES résulterait donc de l'amélioration des participants à la tâche de comparaison, leurs capacités de discrimination des durées se précisant avec l'entraînement. Ces interprétations restent à confirmer étant donné la taille de l'échantillon du groupe sans adaptation. De plus, il faut noter que cette expérience a été jugée comme difficile pour un grand nombre de

participants, entraînant une grande perte expérimentale. Une fois l'échantillon augmenté, des analyses seront conduites selon l'amplitude des saccades (petite ou grande) afin d'étudier l'effet de la variabilité inhérente des saccades, comme pour l'**Article 4**. Les perceptives de cette **Etude 5** seront discutées dans la partie Discussion de cette thèse.

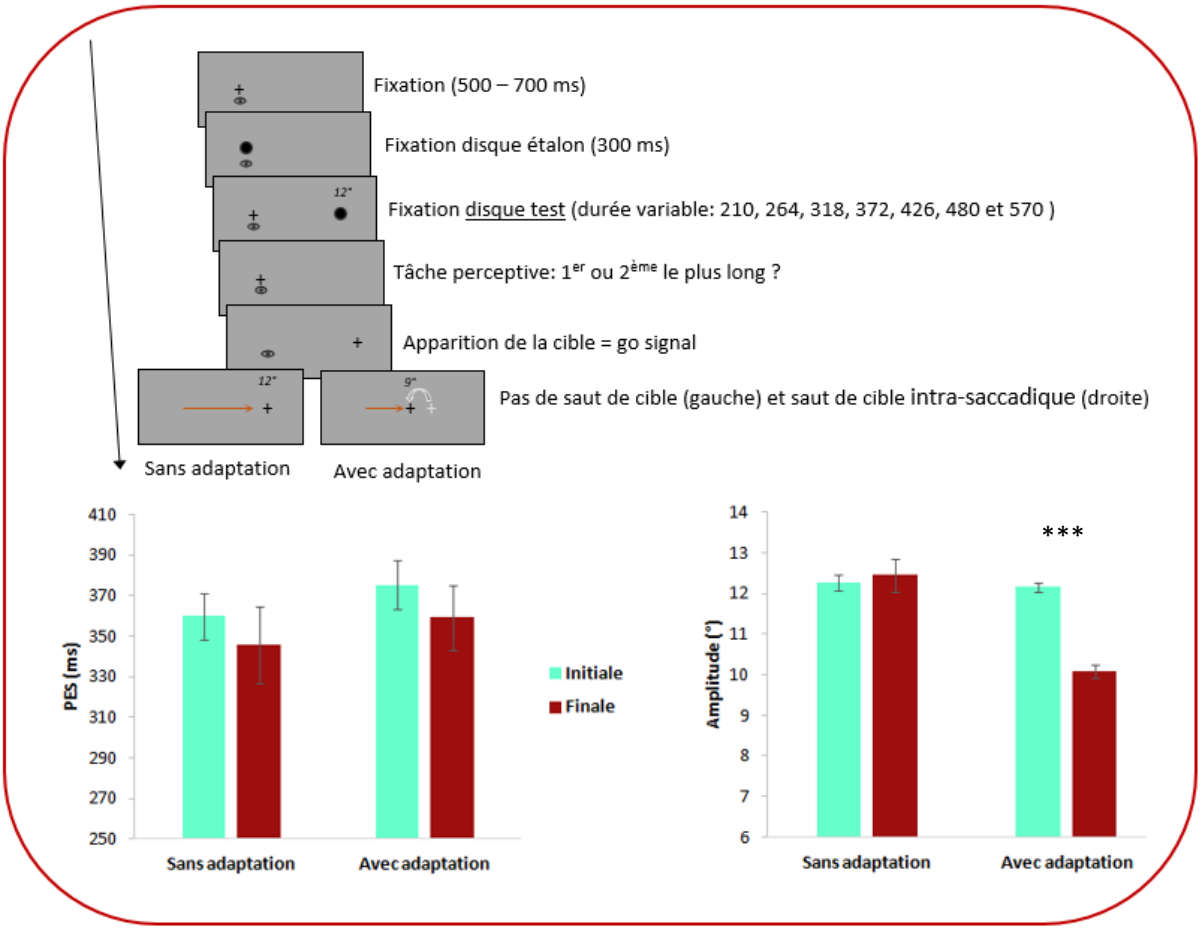

Figure 5. En haut. Décours temporel d'un essai expérimental en phase finale*. Les participants fixent une croix pendant un délai aléatoire de 500 à 700 ms. Ensuite, le disque étalon apparaît pendant 300 ms. Le disque test, de durée variable apparaît à 12°. Pendant cette étape, le participant doit maintenir la fixation sur la croix de fixation qui a remplacé le premier disque. Une fois que le disque test a disparu, le participant doit juger quel disque est apparu le plus longtemps, puis effectuer une saccade vers la cible à 12°. En condition avec adaptation, la cible se déplace pendant la saccade de 3° en direction opposée à la saccade. En condition sans adaptation, la position de la cible est maintenue constante.* ***En bas. Résultats préliminaires.*** *PES (ms) et amplitude (°) en fonction de la phase expérimentale (initiale vs. finale) et du groupe expérimental (sans ou avec adaptation). ***p<0.001, différences significatives entre les amplitudes initiales et finales pour le groupe avec adaptation.*

POINTS-CLES

- La variabilité d'amplitude inhérente aux saccades induit des changements perceptifs : des saccades de plus petites amplitudes entraînent une réduction de la taille perçue d'un objet visuel. Cet effet est accentué lorsqu'on induit artificiellement une diminution de l'amplitude des saccades via le protocole d'adaptation saccadique.
- Les résultats préliminaires sur la perception de durée d'un objet après un changement moteur (adaptation saccadique) ne montrent pas d'effet de la modification de l'amplitude sur la perception des durées.

DISCUSSION

SOMMAIRE

Résultats de la thèse ***171***
Axe 1 : Comment les réponses saccadiques sont impactées par l'information numérique ? 172
Axe 2 : Quelles sont les conséquences perceptives des changements moteurs ? 176
Place de l'action dans le modèle ATOM ***180***
Ouvertures ***183***
Existe-il un lien fonctionnel entre les actions et les nombres ? 183
Quel est la place du langage dans les interactions espace-nombre et temps ? 184
Côté marketing, les propriétés numériques influencent-elles notre perception des prix ? 186

Résultats de la thèse

Avant de faire le point sur l'ensemble des résultats de cette thèse, nous allons d'abord rappeler quels en étaient les objectifs. Les grandes questions de cette thèse se sont construites autour du modèle ATOM élaboré en 2003 par Walsh, selon lequel les informations spatiales, numériques et temporelles sont traitées par un système de magnitude commun et utilisées pour la transformation sensori-motrice. Au lieu de se focaliser sur les différences entre ces trois domaines, Walsh propose de les réunir en suggérant qu'elles partagent un traitement commun, et qu'elles sont imbriquées entre elles puisque la modification perceptive d'une de ces dimensions entraîne une modification de la perception d'une autre dimension. Le modèle prédit que ces interactions entre les différentes dimensions impactent l'action immédiate. Il faut préciser que le modèle s'intéresse aux conséquences sensori-motrices immédiates des magnitudes perceptives et se place donc dans l'étude de mouvements simples de quelques millisecondes. Si la plupart des études ont montré un impact des magnitudes perceptives sur les temps de réaction du mouvement, les paramètres moteurs de ce mouvement ont reçu moins d'attention. Pourtant, certaines études ont montré que les magnitudes perceptives peuvent influencer les magnitudes motrices, ce qui suggère que les magnitudes perceptives et la métrique de l'action sont fortement liées. De plus, le modèle ATOM n'évoque que les conséquences des modifications de la perception sur l'action, et ne pose pas la question d'une influence de l'action sur la perception**. La grande question théorique de ma thèse est de savoir quelle est la place des paramètres moteurs de l'action dans le modèle ATOM de Walsh (2003).**

Nos objectifs étaient d'examiner quelles sont les influences réciproques entre les métriques des systèmes perceptifs et moteurs (paramètres de l'action). Pour répondre à cette question fondamentale, le système oculomoteur et ses spécificités ont été utilisés comme modèle du système visuo-moteur. Les questions théoriques qui en découlent ont été partagées en deux grands axes que nous allons développer en reprenant les principaux résultats des études de cette thèse.

Axe 1 : Comment les réponses saccadiques sont impactées par l'information numérique ?

Les **Articles 1, 2 et 3** avaient pour but de répondre à la question des conséquences sensori-motrices du traitement de l'information numérique. Un grand nombre de travaux ont tenté de comprendre comment si les associations spatio-numériques sont reflétées par nos mouvements. La plupart des études qui montrent un lien entre ces dimensions ont essentiellement utilisé des mesures chronométriques. Or, un mouvement n'est pas défini seulement par son temps de réaction mais également par des paramètres cinématiques (amplitude, durée, vitesse). Si l'information numérique impacte un mouvement, son traitement devrait s'observer à la fois sur le temps de réaction de ce mouvement mais aussi sur sa programmation via l'étude des paramètres cinématiques. Notons que s'il paraît évident que l'information de quantité soit utile pour programmer un mouvement, cela est moins le cas pour l'information numérique lorsqu'elle est présentée sous sa forme symbolique. En effet, le traitement du nombre, qu'il soit présenté en chiffre arabe ou écrit en toutes lettres (mot de chiffre), requiert un traitement sémantique pour que la quantité qu'il représente soit activée. Si le lexique numérique n'est pas encore développé, ces symboles n'auront pas de signification. Le concept de quantité est donc dépendant de la connaissance symbolique du chiffre. Pourtant, les recherches ont montré que les nombres (présentés symboliquement), bien qu'ils ne soient pas nécessairement pertinents pour effectuer la tâche motrice, sont susceptibles de moduler les paramètres de ce mouvement (voir Andres, Olivier, & Badets, 2008; Rugani & Sartori, 2016 pour des revues). Les stimuli utilisés dans les **Articles 1, 2 et 3** étaient toujours des chiffres présentés sous forme arabe ou écrite en toutes lettres (mots de chiffres).

Au-delà des temps de réaction et taux d'erreurs des réponses motrices, les recherches ont déjà montré que le choix de la réponse ne se fait pas indépendamment de la magnitude numérique (ou ordre de grandeur numérique) d'un stimulus, et ce même si l'information numérique n'est a priori pas pertinente pour réaliser la tâche. Par exemple, lorsque le participant doit choisir (1) d'appuyer sur un bouton avec sa main droite ou gauche, ou bien (2) d'effectuer un mouvement latéralisé vers un côté de l'espace (droite ou gauche), la magnitude du chiffre présenté en amorce va influencer le choix de réponse (Daar & Pratt, 2008; Fischer & Campens, 2009; Shaki & Fischer, 2014).

Si un petit chiffre est présenté, le participant aura plus tendance à sélectionner le bouton avec sa main gauche ou bien à effectuer un mouvement vers la gauche. Pour un grand chiffre, c'est le côté droit qui est davantage choisi. Les informations spatio-numériques influencent donc « **à quelle vitesse »** les réponses sont initiées (i.e. temps de réaction), « **quelle »** réponse est sélectionnée (i.e. choix gauche/droite), mais la question de « **comment »** les paramètres moteurs sont impactés reste très peu documenté. L'analyse des paramètres cinématiques du mouvement permet alors de répondre à cette question.

Dans l'**Article 1**, nous souhaitions tout d'abord répliquer l'effet SNARC (Dehaene et al., 1993) sur des réponses saccadiques. En effet, pour ensuite explorer « **comment »** les associations spatio-numériques impactent les paramètres saccadiques, nos premiers objectifs étaient (1) d'observer cet effet classique avec le système visuo-moteur et (2) plus généralement de comprendre les spécificités de ce système dans sa relation avec le traitement numérique. Si l'effet a été répliqué de nombreuses fois avec la réponse manuelle, seules quelques études se sont intéressées aux réponses oculaires (Fischer, Castel, Dodd, & Pratt, 2003; Hesse, Fiehler, & Bremmer, 2016; Schwarz & Keus, 2004), sans jamais moduler le format de présentation des chiffres (chiffres uniquement présentés dans la notation arabe). L'étude de l'**Article 1** avait pour but de comparer l'effet SNARC sur des réponses manuelles et saccadiques avec la présentation de chiffres arabes et des chiffres écrits en toutes lettres. Ces deux types de réponses motrices sont caractérisés par des temps d'initiation différents : les réponses saccadiques sont plus rapides que les réponses manuelles. Concernant le format de présentation du chiffre, notre étude consistait à comparer l'effet SNARC avec des numérosités symboliques qui diffèrent dans leur temps d'activation de la magnitude : les chiffres arabes induisent une activation plus rapide que les mots de chiffre (Fias, 2001). Comme dans l'étude princeps de Dehaene et al. (1993), la tâche des participants était de répondre à gauche ou à droite selon la parité d'un chiffre présenté au centre de l'écran via un appui-bouton (réponses bimanuelles) et ou en effectuant une saccade (réponse saccadique). Comme attendu, les résultats ont montré la présence d'un effet SNARC pour les deux formats de chiffre sur les réponses manuelles. Sur les réponses saccadiques, l'effet SNARC avec les chiffres arabes obtenu était plus faible en comparaison avec celui observé sur les réponses manuelles et était absent avec les mots de chiffre. Les analyses complémentaires ont montré que les associations spatio-numériques, bien qu'elles soient automatiques, sont modulées par le temps de réaction. Nous avons proposé que l'effet SNARC soit plus prononcé avec des réponses motrices plus lentes (i.e. réponses bimanuelles) que rapides (i.e. réponses saccadiques), et avec des stimuli numériques induisant des temps de traitement plus rapides (i.e. chiffres arabes). Cette idée est appuyée par les différences observées sur la rapidité des participants puisque les participants les plus lents obtiennent un effet SNARC plus prononcé. Cette idée avait déjà rapidement été évoquée par Wood et ses collègues dans une méta-analyse sur le

SNARC (2008). Nous avons apporté des précisions quant aux facteurs à prendre en considération dans cette dépendance au temps qui est non seulement liée à l'effecteur impliqué, mais aussi au format de présentation des chiffres et à la rapidité du sujet. Dans une approche similaire, une récente recherche sur des réponses manuelles a corroboré nos résultats (Didino et al., 2019) en testant l'impact de la tâche à réaliser sur l'effet SNARC. Leur hypothèse était qu'une tâche qui requiert un traitement sémantique (e.g. tâche de parité ou comparaison de magnitude) entraîne un effet SNARC plus fort qu'une tâche qui nécessite un traitement de propriétés plus superficielles (i.e. jugement de couleur ou détection de phonème). Leurs résultats montrent que l'effet SNARC n'est pas modulé par la nature du traitement du chiffre comme attendu, mais plutôt par la latence des réponses manuelles. De façon similaire aux résultats de l'**Article 1**, une augmentation des temps de réponse est corrélée avec un effet SNARC plus fort. Pour conclure, il semble important de prendre en compte les propriétés temporelles des systèmes moteurs et du traitement numérique afin d'observer des interactions entre l'espace et les nombres sur les temps de réaction des réponses motrices. Le système saccadique étant un système très rapide et l'association spatio-numérique nécessitant un certain temps pour être reflétée, il s'agit donc de deux points cruciaux à prendre en considération lorsqu'on souhaite étudier les liens entre saccade et nombre.

Dans un second temps, nous avons exploré dans quelle mesure les paramètres de la saccade, autres que son temps de réaction (latence), pouvaient également refléter les associations spatio-numériques. Cependant, dans un paradigme classique d'effet SNARC, Fischer et al. (2003) n'ont initialement pas trouvé d'interaction entre les nombres et l'espace sur l'amplitude de la saccade. Sur la base des propriétés du système saccadique, nous avons élaboré plusieurs approches pour tester cette question. L'effet global (i.e. présentation d'un *distracteur* proche de la *cible* qui dévie le point d'arrivée de la saccade, voir Van der Stigchel & Nijboer, 2011 pour une revue et voir la section 3.2.2.2) se révèle être pertinent pour étudier comment l'information numérique peut impacter l'amplitude saccadique sur la base de la saillance des propriétés des stimuli visuels. Cette hypothèse s'appuie sur les données de recherches précédentes qui montrent que l'effet global est modulé par (1) des informations de taille et de luminosité des stimuli de la configuration visuelle (Deubel et al., 1984; Findlay, 1982) et (2) des informations plus abstraites liées à l'orthographe (Beauvillain et al., 1996). Dans l'**Article 2**, nous avons fait l'hypothèse que l'effet global pourrait également être modulé par une information numérique. La tâche des participants était d'effectuer une saccade vers un chiffre-*cible* présenté seul ou accompagné d'un autre chiffre spatialement proche (le chiffre-*distracteur*). Les résultats ont montré que l'information numérique module l'amplitude de la saccade lorsque les observateurs devaient viser (1) un chiffre seul (i.e. plus petite amplitude pour les chiffres de petites magnitudes) ou (2) un chiffre-*cible* en présence d'un chiffre-*distracteur*. Dans ce dernier cas, lorsque le distracteur était numériquement plus grand et plus fort en luminosité que la cible, le

point d'arrivée de la saccade était plus fortement dévié vers celui-ci que lorsqu'il était numériquement plus petit et plus lumineux que le chiffre-*cible*. Ces résultats suggèrent que l'information de magnitude numérique peut non seulement moduler l'amplitude saccadique, mais en plus que cette influence s'observe sur l'effet global lorsque la magnitude numérique du stimulus visuel est congruente avec la magnitude de l'intensité lumineuse. Néanmoins, seule, la magnitude numérique ne semble pas être un facteur assez fort pour dévier le point d'arrivée de la saccade vers le chiffre le plus grand numériquement. L'**Article 2** a donc montré que la programmation saccadique est sensible à l'information numérique, bien que l'effet numérique reste faible dans nos conditions expérimentales. Par conséquent, la question de l'influence de la magnitude numérique sur l'amplitude saccadique nécessitait d'être approfondie, raison pour laquelle nous avons élaboré une expérience supplémentaire.

L'**Article 3** a été conduite suite à nos résultats de l'**Article 2** et à la publication des travaux de Fischer, Fischer, Huber, Strauß, et Moeller (2018). Pour rappel, Fischer et collaborateurs (2018) ont montré que la magnitude numérique module l'amplitude des mouvements de glissement de doigt sur une tablette. Les participants devaient déplacer une croix présentée au centre de l'écran vers la gauche ou la droite de l'écran selon les propriétés d'un chiffre présenté juste au-dessus de la croix (parité ou magnitude). De façon ingénieuse, aucune cible visuelle pour le mouvement n'était présentée et donc aucune contrainte de taille du mouvement n'était imposée. Nous avons fait l'hypothèse que cette absence de contrainte sur la taille du mouvement était une condition favorable à l'émergence d'un effet numérique sur l'amplitude. Cette hypothèse est d'ailleurs appuyée par les études qui montrent que lorsque les participants sont libres de sélectionner un côté de réponse, on observe alors une manifestation de l'association entre les nombres et l'espace (Daar & Pratt, 2008; Loetscher & Nicholls, 2010; Fernández, Rahona, Hervás, Vázquez, & Ulrich, 2011; Shaki & Fischer, 2014).

En nous inspirant du protocole de Fischer et al. (2018), nous avons proposé à nos participants de réaliser des saccades vers la gauche ou vers la droite d'un écran vide, c'est-à-dire dépourvu de cible. La direction de la saccade était conditionnée par la magnitude d'un chiffre présenté au centre de l'écran, selon qu'il était plus petit ou plus grand que 5. Sur les latences saccadiques, l'effet SNARC et l'effet de distance numérique ont été répliqués et pour la première fois, un effet de distance numérique a été trouvé sur les amplitudes saccadiques. La taille de la saccade était plus grande pour les chiffres les plus éloignés numériquement du chiffre de référence (i.e. chiffre 5). La taille relative des chiffres, par rapport au standard numérique 5, se reflète donc sur l'amplitude du mouvement saccadique. Ces résultats tendent à confirmer notre hypothèse que l'absence de cible a favorisé l'émergence d'un effet numérique sur l'amplitude de la saccade puisque le système visuo-moteur n'était pas contraint par une position prédéfinie. Concernant l'association entre les nombres et

l'espace, les résultats ont montré que l'effet de distance trouvé sur l'amplitude saccadique tend à être plus fort lorsque la consigne de réponse est congruente avec la ligne mentale de nombres. En d'autres termes, lorsque le participant a pour consigne d'effectuer une saccade à gauche pour les chiffres inférieurs à 5 et à droite pour les chiffres supérieurs à 5 (plutôt que gauche >5, droite <5), la différence d'amplitude saccadique entre les chiffres extrêmes (1 et 9) et intermédiaire (4 et 6) est d'autant plus grande. Une hypothèse est que la direction de la ligne mentale pourrait potentiellement moduler l'effet de distance observé sur les amplitudes saccadiques, mais cela reste à étayer dans de futures recherches.

Pour conclure, les résultats des **Articles 1, 2 et 3** ont montré que l'information numérique modifie non seulement le temps des réponses saccadiques mais aussi la taille du mouvement saccadique. Ces résultats inédits viennent s'ajouter aux preuves comportementales examinant les mouvements de saisie que la programmation motrice est sensible à l'information numérique (Andres, Ostry, et al., 2008; Badets & Pesenti, 2010; Lindemann et al., 2007). De plus, nos résultats ont montré que les effets numériques (i.e. effet SNARC, effet de distance) sont contraints à des conditions qui favorisent ou entravent leur émergence. Notamment, les effets spatio-numériques sont observables sur les latences à condition qu'elles soient suffisamment longues : la rapidité des réponses saccadiques conduit à les amoindrir (**Article 1**). Les effets numériques sont plus faibles lorsque la programmation saccadique est contrainte par une cible saccadique (**Article 2**) que lorsqu'elle ne l'est pas (**Article 3**).

Axe 2 : Quelles sont les conséquences perceptives des changements moteurs ?

La question d'une influence de l'action sur la perception n'a pas été abordée dans le modèle ATOM (Walsh, 2003). Pourtant, si la magnitude des dimensions perceptives partage un système de métrique avec le système moteur, une relation réciproque est à envisager. Notre question de recherche s'est construite autour des études faisant le lien entre les saccades et la perception visuelle. Certaines ont par exemple montré que le simple fait d'effectuer une saccade modifie la perception de la localisation d'une cible, de son temps de présentation et de la quantité d'éléments visuels présentés (D. C. Burr et al., 2010). Puisqu'effectuer une saccade modifie conjointement la perception des trois dimensions de temps, d'espace et de nombre, cela renforce l'idée que ces trois dimensions partagent des codes neuronaux avec la programmation saccadique. La question que nous nous sommes posée a été de savoir s'il existe des relations entre les variations d'amplitude de la saccade et la magnitude perceptive de type « plus A – plus B » comme le prédit le modèle ATOM pour les différentes dimensions perceptives. L'**Article 4** a testé quelles étaient les conséquences

perceptives des variations inhérentes à la variabilité des saccades sur la taille perçue d'un disque que les sujets devaient comparer à un étalon. Les saccades sont naturellement hypométriques et nous avons souhaité pousser le système à réduire l'amplitude saccadique en induisant expérimentalement une adaptation saccadique en diminution d'amplitude via le paradigme de double-saut de cible afin de favoriser la variabilité de l'amplitude des saccades. Pour rappel, les participants devaient juger si un premier disque de taille variable, présenté en périphérie à la place de la cible saccadique juste avant la saccade, était plus grand qu'un second disque étalon présenté en fovéa après la saccade. Pour la moitié des participants seulement, une adaptation en diminution d'amplitude a été induite (i.e. la cible saccadique se déplaçait systématiquement pendant la saccade de quelques degrés en direction opposée à celle de la saccade). Pour l'autre moitié, la position de la cible était maintenue constante. L'expérience se déroulait en trois phases. Pour le groupe en diminution d'amplitude, la phase initiale correspondait à une phase dans laquelle la position de la cible n'était pas déplacée pendant la saccade, la seconde phase à une phase de mise en place d'adaptation saccadique (saut de cible progressif de 1 à 3° d'angle visuel) et la phase finale à une phase de maintien de l'adaptation saccadique (saut de cible toujours à 3°). Les résultats ont montré que les variations naturelles d'amplitude ont induit des changements perceptifs que l'adaptation saccadique soit induite ou non. Les saccades de plus petites amplitudes entraînent une perception de la taille du disque inférieure à celle observée pour des saccades de plus grandes amplitudes. Cet effet est accentué pour les participants ayant subi une adaptation saccadique. Une seconde analyse a comparé les résultats à la tâche perceptive en fonction de la phase (initiale vs. finale). Aucune différence sur l'amplitude ou sur les données d'estimation de taille n'a été rapportée pour le groupe non adapté, attestant de la stabilité des performances saccadiques et perceptives au cours de l'expérience. En condition de diminution d'amplitude, les participants ont diminué avec succès l'amplitude saccadique de leurs saccades consécutivement au déplacement de la cible, comme attendu, et conformément à nos hypothèses, les participants avaient tendance à sous-estimer la taille du second disque après cette adaptation saccadique (en phase finale), en comparaison à la phase initiale au cours de laquelle la cible n'était pas déplacée. La perception de la taille d'un stimulus semble donc varier avec la taille de l'amplitude des saccades, que cette variation soit naturelle ou induite expérimentalement par l'adaptation saccadique. Pour résumer, les résultats de l'**Article 4** offrent pour la première fois un argument en faveur de relations réciproques entre la métrique de la saccade et la métrique de la magnitude spatiale (dans le sens « moins A – moins B »). Ces résultats viennent étayer ceux de l'étude de Bosco, Lappe, et Fattori (2015) qui a montré un changement de taille perçue suite à un changement moteur. Cependant, dans leur étude, le changement moteur a été induit par un changement intra-saccadique de taille du stimulus visuel (et donc du centre de gravité de la configuration visuelle). Par conséquent, le changement de taille perçue du stimulus pourrait être dû

soit (1) au changement réel de la taille du stimulus induisant l'adaptation saccadique ou (2) au changement moteur induit par l'adaptation saccadique. L'**Article 4** suggère que c'est le changement moteur lui-même qui a impacté la taille perçue d'un objet, principalement car les changements moteurs que nous avons induits n'étaient pas consécutifs à un changement de taille de l'objet.

Dans l'**Etude 5**, nous avons examiné si les conséquences perceptives obtenues sur la taille dans l'**Article 4** pouvaient se généraliser à d'autres magnitudes perceptives du modèle ATOM. Une expérience similaire à celle de l'Article 4 a donc été construite en faisant varier la magnitude temporelle d'un stimulus. Cette étude est toujours en cours de réalisation et de traitement. Cette fois, les participants doivent d'abord effectuer la tâche perceptive et ensuite la tâche saccadique. Pendant la tache perceptive, ils doivent juger lequel du premier disque présenté en fovéa (étalon, durée fixe), ou du second disque de durée variable présenté en périphérie, est apparu le plus longtemps. Une fois qu'ils ont donné leur réponse, les participants effectuent une saccade vers la cible saccadique positionnée à l'emplacement du second disque, en périphérie. Un groupe de participant est affecté dans une condition sans déplacement de la cible et un autre groupe dans une condition d'adaptation saccadique dans laquelle la cible est déplacée pendant la saccade en direction opposée à celle de la saccade (i.e. entraînant une diminution d'amplitude). L'expérience est composée de trois phases comme dans **l'Article 4,** ce qui correspond pour le groupe adaptation à une phase initiale sans saut de cible, une seconde phase avec un saut progressif de la cible pendant la saccade (de 1 à 3°), et une phase finale dans laquelle le saut de cible pendant la saccade est maintenu constant (3°). Pour le groupe sans adaptation, la cible ne se déplace pas. Comme attendu, les amplitudes des saccades du groupe en diminution d'amplitude diminuent significativement, attestant que l'adaptation est mise en place avec succès. Comme attendu également, l'amplitude reste stable pour le groupe sans adaptation. Les analyses préliminaires des données perceptives ont tout d'abord examiné l'impact de la phase et du groupe sur l'estimation temporelle. De façon étonnante, les résultats montrent que, par rapport à la phase initiale, le point d'équivalence subjectif [4] tend à diminuer dans la phase finale, ce qui suggère que la durée perçue du stimulus a augmenté. Ces résultats s'observent dans les deux groupes, c'est-à-dire avec ou sans adaptation. Cette augmentation de la durée perçue s'explique sûrement par une amélioration des performances à la tâche perceptive. En effet, les données mettent en avant que l'estimation de la durée du stimulus (i.e. le PES) se précise en se rapprochant de la valeur du temps de présentation du disque étalon. Par conséquent, il semble difficile d'attribuer la différence de perception temporelle à une surestimation des durées mais plutôt à une amélioration dans le jugement perceptif. Néanmoins, des analyses complémentaires sont nécessaires afin d'examiner si les variations naturelles d'amplitude saccadique

[4] Le point d'équivalence subjectif correspond à la durée du disque variable pour laquelle le participant a 50% de chance de répondre que c'est le premier disque (ou le second) qui est présenté le plus longtemps.

sont susceptibles de modifier la perception temporelle comme c'est le cas dans l'**Article 4**. De plus, nos résultats préliminaires ne coïncident pas avec les études précédentes qui montrent un impact du mouvement sur la perception temporelle (Wenke & Haggard, 2009; Yon, Edey, Ivry, & Press, 2016). Par exemple, effectuer des mouvements manuels de courte ou de longue durée entraîne des modifications de la perception temporelle. Plus la durée du mouvement est longue, plus la durée perçue du stimulus est longue (Yon et al., 2016), et ce, que la modulation de la durée du mouvement ait été induite explicitement ou implicitement. Ceci suggère donc que la durée de l'action impacte la perception temporelle d'un stimulus. De façon intéressante, afin d'induire implicitement des mouvements de différentes durées, les auteurs ont demandé aux participants de réaliser des mouvements de différentes amplitudes (près : 5-8cm et loin : 15-18cm), induisant ainsi des mouvements de durée différente (près : 213 et loin : 1644 ms). La durée du mouvement est peut-être donc un facteur à prendre en considération lorsqu'on teste les relations entre action et perception du temps. Les données de notre **Etude 5** ont montré une légère différence de durée des saccades (3 ms) après adaptation, peut-être pas assez importante pour modifier la perception de la durée. Il serait intéressant dans une future étude d'induire des différences de durées du mouvement plus importantes afin d'observer des différences sur la perception temporelle. Une solution serait d'adapter des saccades de plus grandes amplitudes et/ou d'augmenter la taille du saut intra-saccadique. Toutefois, une augmentation trop importante de l'amplitude des saccades revient à effectuer des saccades inhabituelles (supérieur à 20-25°), souvent accompagnées de mouvements de la tête dans des situations naturelles. De même, un déplacement intra-saccadique de la cible trop important risque d'être perçu par le participant lorsqu'il est supérieur à 50% (Deubel, Wolf, & Hauske, 1986). Ainsi, comparé au protocole qu'utilise l'Etude 5 dans lequel l'excentricité de la cible était de 12° et le saut intra-saccadique de 25%, les possibilités de tester cette question existent mais restent limitées.

Pour conclure, l'**Article 4** a montré que la variation de l'amplitude saccadique engendre des modifications perceptives de la taille d'un objet mais les résultats de l'**Etude 5** ne permettent pas de conclure sur les modifications perceptives relatives à son temps de présentation. Si la durée du mouvement n'est pas un paramètre crucial à prendre en considération pour observer un effet de l'action sur la perception de taille, son rôle pour la perception des durées reste à déterminer en ce qui concerne la saccade. Ces résultats sont une première étape dans l'étude de l'impact des mouvements sur notre façon de percevoir la taille des objets et leur temps de présentation (durée) et suggèrent que la métrique de l'action peut aussi se calibrer sur un continuum de grandeur commun aux dimensions perceptives.

Place de l'action dans le modèle ATOM

La question fondamentale de cette thèse était de comprendre la place de l'action (paramètres spatiaux et temporels) dans le modèle ATOM de Walsh (2003). L'intérêt du modèle réside dans l'idée que ces dimensions sont traitées par un mécanisme commun de magnitude. Cela suggère que les magnitudes sont appréhendées en termes de « plus que » et « moins que » sur un continuum de grandeur, et que ce continuum est commun aux trois dimensions (espace, temps et nombre). De ce fait, lorsque la magnitude de l'une des trois dimensions se déplace sur le continuum, elle entraîne avec elle des modifications dans les autres dimensions perceptives. Si la métrique de la saccade se calibre également sur ce continuum, on devrait observer (1) des effets du traitement des magnitudes perceptives sur les paramètres moteurs du mouvement et (2) des conséquences perceptives de la modification des magnitudes motrices observables sur différents paramètres du mouvement. Les résultats de nos études vont dans le sens de ces deux hypothèses et suggèrent donc un partage, du moins partiels, du système de magnitude commun pour la perception et l'action.

Le premier axe visait donc à comprendre « **comment** » la sortie motrice est modulée par la magnitude numérique. Cette question a d'ailleurs été récemment posée par Rugani et Sartori (2016, p.3): « *A second step would be to analyze the kinematics of movement that provides an implicit measure of the association between numbers and actions* ». Les auteurs soulignent l'intérêt d'analyser les paramètres cinématiques des mouvements qui offriraient une mesure plus implicite des associations entre les nombres et l'action. Les paramètres spatiaux d'amplitude, de position ou de trajectoire du mouvement ont permis d'améliorer la compréhension de l'utilisation de la magnitude liée à la quantité pour la programmation motrice, d'autant plus lorsque que cette information n'est, a priori, parfois pas pertinente pour le système moteur en ce qu'elle n'est pas nécessaire pour diriger le mouvement. Les résultats des **Articles 1, 2 et 3** déjà présentés dans la littérature, ajoutés à ceux de la littérature, fournissent des arguments forts en faveur de l'hypothèse selon laquelle le traitement numérique et la programmation saccadique partagent des codes neuronaux communs.

Concernant le second axe, le but était d'examiner si la modification des paramètres du mouvement avait une influence sur la perception des magnitudes spatiale et temporelle. Concernant les interactions entre le traitement numérique et l'action, la question d'une possible influence réciproque a pour l'instant reçu peu d'attention, comme l'ont remarqué Badets et Rensonnet (2015, p615): *« si l'ensemble de ces études montrent un lien entre chiffres et actions, elles le font toujours dans le sens « du sémantique au moteur » : c'est le traitement du chiffre (sémantique) qui vient influencer l'action (moteur) ».* L'**Article 4**, par l'étude des variations d'amplitude saccadique sur la perception de la taille d'un objet, apporte une contribution majeure dans la compréhension de

l'influence réciproque entre les magnitudes perceptives d'un stimulus visuel et la métrique des saccades. Ces résultats sont en accord avec le modèle ATOM et les théories idéomotrices selon lesquelles les représentations du temps, de l'espace et des nombres sont nécessaires pour l'action, et que l'apprentissage des conséquences de nos actions module également la façon dont nous percevons le monde. Ces correspondances entre la métrique de l'action et de la perception seraient basées sur des statistiques du monde réel (Rinaldi & Girelli, 2017). Par conséquent, le système moteur et le système perceptif pourraient calibrer leurs magnitudes l'un par rapport à l'autre.

Pour conclure, bien que certains résultats aillent en faveur d'une influence de l'action sur la perception, la littérature sur la question de l'influence des magnitudes motrices sur la perception manque d'arguments. Il semble difficile à l'heure actuelle d'accorder aux paramètres de l'action la même place que les dimensions numérique, spatiale et temporelle, dans le modèle ATOM. Une étude qui souvent présentée comme étant un argument majeur d'une influence de l'action sur la génération de chiffres est celle de Loetscher et al. (2010). Pour rappel, les participants placés dans l'obscurité devaient générer des chiffres compris entre 1 et 30 pendant que leurs mouvements des yeux étaient enregistrés. Les auteurs concluent que la direction et la taille de la saccade prédisent la magnitude du nombre qui est sur le point d'être généré. Ce résultat est souvent interprété comme la démonstration d'un impact de l'action sur le traitement des magnitudes numériques. Pourtant, les résultats expriment seulement une corrélation entre la position des yeux qui précède le chiffre généré, ce qui ne permet pas de répondre à la relation de causalité entre les deux. En effet, la position des yeux est recueillie 500 millisecondes avant la génération du nombre. Or, à ce moment-là, le nombre qui est sur le point d'être généré est probablement déjà activé. Par conséquent, il semble difficile de déterminer si c'est la position du regard (ou la taille du changement de position) qui a influencé le choix du nombre ou si c'est l'activation du chiffre qui a modulé les paramètres moteurs de la saccade. Le prochain défi pour notre équipe est d'éclaircir ce lien en testant l'impact de la direction et de la taille des saccades sur la génération d'un nombre. Pour cela, nous proposons un protocole dans lequel le participant effectue d'abord une saccade vers une cible, présentée à gauche ou à droite à différentes excentricités avant de réaliser une tâche de génération de nombres. Un protocole similaire a été utilisé par Loetscher et al. (2008) avec des mouvements de la tête. Un chiffre devait être généré après un mouvement de la tête vers la gauche ou vers la droite, sans manipulation de l'amplitude de ce mouvement. Les résultats montrent que le nombre de petits chiffres générés est plus important après les mouvements de tête vers la gauche que vers la droite. Les performances à la tâche de génération de chiffres après un mouvement saccadique imposé permettraient alors de montrer comment les propriétés de direction et d'amplitude de la saccade modulent notre représentation des nombres sur la base de l'hypothèse que la métrique saccadique influence la génération libre d'exemplaires numériques.

Ouvertures

Existe-il un lien fonctionnel entre les actions et les nombres ?

Une question fondamentale pour les chercheurs qui étudient les liens étroits entre le système moteur et la perception des nombres est de comprendre d'où proviennent ces interactions et quelles sont leur fonction. Des réponses ont déjà été apportées concernant les interactions entre système moteur manuel et le nombre par les théoriciens de la cognition incarnée. Plus spécifiquement, il existerait des représentations communes aux chiffres et aux doigts (Andres, Olivier, et al., 2008; Thevenot, 2014). D'ailleurs, plusieurs chercheurs proposent que les représentations digitales sont importantes dans le développement des représentations numériques et pour l'initiation aux tâches arithmétiques simples comme l'addition (Thevenot, 2014). Par exemple, chez les enfants, les capacités de gnosie digitale (capacité à reconnaître et sélectionner les doigts des mains) sont associées avec des compétences numériques plus élevées (Gracia-Bafalluy & Noel, 2008). Même les adultes utilisent parfois leurs doigts pour compter, et la main avec laquelle ils commencent à compter semblerait influencer l'effet SNARC (Fischer, 2008). Par cette stratégie de comptage, nous avons d'ailleurs appris à associer chaque doigt de nos mains à des chiffres (Di Luca, Granà, Semenza, Seron, & Pesenti, 2006). Le lien fonctionnel entre les doigts et les chiffres a été testé dans une étude dans laquelle les adultes devaient résoudre des problèmes arithmétiques d'additions simples (Badets, Pesenti, & Olivier, 2010). La réponse verbale donnée par le participant était suivie par l'affichage du résultat présenté soit sous la forme d'une configuration de doigts, soit sous la forme d'une configuration de bâtons. Dans la condition pour laquelle le résultat était affiché avec une représentation de doigts, les participants étaient plus rapides pour résoudre l'addition qu'avec une configuration en bâtons. La simple vision d'une main biologique a donc facilité le traitement numérique, alors même que la main n'était présentée qu'une fois que le participant donne sa réponse. Les auteurs de cette étude proposent que le lien entre les doigts et les chiffres soit sous-tendu par un mécanisme idéomoteur, selon lequel l'observation de la configuration des doigts aide à résoudre des problèmes arithmétiques simples. Ce lien aurait pris forme pendant l'enfance à partir de stratégies d'utilisation des doigts pour compter, processus par lequel les enfants apprennent à se représenter les numérosités sous un code plus abstrait et font la correspondance avec les chiffres arabes et les mots de chiffres (Butterworth, 1999). Si le développement de la cognition numérique se fait par l'intégration sensori-motrice des représentations des doigts, cela explique les interférences trouvées entre le système moteur manuel et les chiffres (Andres, Olivier, et al., 2008; Badets & Pesenti, 2010; Lindemann et al., 2007). Le rôle des doigts dans la cognition numérique peut être expliqué par les théories idéomotrices mais qu'en est-il du rôle fonctionnel entre la saccade et les nombres ? La vision des doigts semble jouer un rôle essentiel dans le

comptage (Badets & Rensonnet, 2015). Cette représentation des chiffres basée sur les doigts n'est-elle pas partagée par des aspects de vision ou de mouvements des yeux ? Si Hesse et collaborateur (2016) n'ont pas trouvé de correspondance entre le système moteur et le système saccadique dans l'observation de l'effet SNARC, d'autres arguments laissent penser que ces réseaux moteurs partagent des bases communes puisque des recalibrations motrices de l'amplitude des saccades volontaires vont impacter les mouvements manuels. Par exemple, l'adaptation saccadique se transfère aux mouvements de pointage manuels, ce qui suggère des cartographies sensori-motrices communes pour la production des saccades et des mouvements de la main (Cotti, Guillaume, Alahyane, Pelisson, & Vercher, 2007). Si aujourd'hui l'étude des mouvements des yeux est vu comme une valeur ajoutée (Mock et al., 2016), le prochain défi est de comprendre d'où provient ce lien entre les saccades et la cognition numérique et quel est le rôle de l'expérience (Rugani & Sartori, 2016).

Quel est la place du langage dans les interactions espace-nombre et temps ?

Dans cette discussion, il me semble aussi important d'évoquer comment le langage est révélateur des interactions entre les dimensions de nombre, d'espace et de temps à travers l'action. Prenons un exemple concret. Dans le paragraphe précédent, nous avons employé le terme représentation digitale. Le mot *digital*, lorsqu'il ne fait pas référence au numérique, peut s'employer également pour parler de gnosie digitale, empreinte digitale et est donc relatif aux doigts. Son étymologie latine est *digitus* qui signifie « doigt ». Ce mot a dérivé sur le mot « digit » en anglais, qui signifie « doigt » suite à l'utilisation de nos doigts pour se représenter les chiffres ! Le mot anglais « digit » s'est donc construit autour de la dimension corporelle de la main. D'ailleurs, chez certains peuples ayant un lexique numérique très limité pour définir les chiffres jusqu'à 5, le mot employé pour le chiffre 5 est exactement le même mot que celui pour le mot « main » (Izard et al., 2008). Ces exemples montrent qu'au-delà du lien fonctionnel entre la main - les doigts - et les nombres, l'étude du langage offre aussi un grand nombre d'informations sur ces relations. L'étude des habitudes de langage a d'ailleurs été le point de départ qui a permis d'élaborer la **Théorie de Métaphore Conceptuelle** (*Conceptual Metaphor Theory* en anglais, ou **CMT**, Lakoff & Johnson, 1980). Ce modèle se rapproche beaucoup du modèle ATOM puisqu'il explique également les interactions entre les dimensions de temps, d'espace et de nombre. CMT part de l'observation des métaphores linguistiques qui sont omniprésentes dans toutes les langues du monde (Lakoff & Johnson, 1980). Par exemple, des événements temporels sont souvent décrits en termes de repères spatiaux « la soutenance de ma thèse est proche », « je vais sur mes 27 ans ». Lorsque nous évoquons le passé/le futur, on dit qu'il est derrière/devant nous et un signe de la main vers l'arrière/avant accompagne

parfois cette métaphore. Le langage parlé associé au langage corporel sont donc révélateurs des interactions entre les différentes dimensions. Ces exemples, qui ne sont pas isolés, décrivent une relation unique, celle des dimensions du nombre ou du temps ordonné dans la dimension spatiale. Rares sont les cas de relation inverse. Ce point est important puisque le rôle fondamental de l'espace au cœur des autres dimensions qui différencie CMT du modèle ATOM. ATOM prédit des interactions symétriques entre les différentes dimensions tandis que CMT propose une fondation spatiale pour la cognition numérique et temporelle. Les effets SNARC et STEARC (voir section 2.1.2) sont d'ailleurs tout à fait compatible avec CMT puisqu'ils représentent l'association des nombres et du temps selon les localisations spatiales. Ces exemples mettent également en avant la contribution du système moteur dans les tâches numériques et temporelles. Bien que les interactions entre les dimensions spatiales, numériques et temporelles et l'action soient parfois compatibles avec le modèle CMT, l'action n'est pas au cœur de ce modèle au contraire d'ATOM. Les deux modèles se différencient en termes de perspectives au niveau fonctionnel. Le rôle de ces dimensions perceptives est de guider les mouvements dans ATOM, alors que dans CMT, ces dimensions sont utilisées pour le raisonnement, la compréhension du langage et le développement. Par exemple, l'utilisation de nos doigts pour compter pendant l'apprentissage du calcul et même une fois cet apprentissage acquis suggère qu'il existe un substrat commun pour la représentation sémantique entre les circuits moteurs et langagiers.

Winter, Marghetis et Matlock (2015) proposent qu'ATOM et CMT soient complémentaires puisqu'ils ont un objectif commun mais se différencient en termes de prédiction des liens entre dimensions. Le modèle ATOM permettrait d'expliquer les relations de plus bas niveau entre les dimensions en mettant en avant le principe d'évolution, tandis que le modèle CMT expliquerait comment l'expérience a façonné une asymétrie conceptuelle allant d'un domaine source (l'espace) aux domaines cibles (le nombre, le temps). Selon cette théorie, les individus construisent des métaphores conceptuelles au travers des caractéristiques du monde réel liant les domaines les uns aux autres, comme l'ont proposé Rinaldi et Girelli avec l'action (voir section 2.3.1, 2017). Celui qui va le plus vite, c'est souvent celui qui a les plus longues jambes, les gros objets sont souvent les plus lourds. Pour résumer, Winter et al. (2015) proposent qu'ATOM serait plus centré sur la phylogénie selon laquelle l'Homme naît avec un système de magnitude commun aux trois dimensions biologiquement prédéterminé puisque système semble être partagé par les nouveau-nés et de nombreuses espèces animales. CMT serait davantage basé sur l'expérience et l'observation des relations dans le monde naturel. Le système de magnitude se développerait et deviendrait une base pour des concepts culturellement spécifiques et plus complexes, comme c'est le cas pour le développement des compétences arithmétiques. Si l'utilisation des doigts est un facteur permettant le développement de la compréhension des nombres, il semblerait que les capacités à cartographier

les nombres dans l'espace le long d'une ligne spatiale soit un indicateur des capacités en mathématiques (Gunderson, Ramirez, Beilock, & Levine, 2012). Certaines études ont même montré qu'entraîner des enfants à cartographier les nombres dans l'espace augmenterait leur compréhension des mathématiques mais aussi plus largement celle des sciences (Dehaene et al., 2004; Ramani & Siegler, 2008; Siegler & Ramani, 2008; Uttal et al., 2013).

Ces résultats pourraient avoir de fortes implications dans le domaine de l'éducation et de la pédagogie. Toutes ces connaissances peuvent être mises à profit afin de détecter des enfants en difficulté dans le domaine des mathématiques et de déterminer comment améliorer leurs compétences numériques via la création d'outils pédagogiques ou de méthodes d'enseignement qui favorisent leur réussite scolaire. Ramani et Siegler (2008) ont notamment proposé des entraînements basés sur l'utilisation d'un jeu numérique linéaire qui permet d'améliorer rapidement les capacités des enfants entre 4 et 6 ans à effectuer des tâches d'estimation sur une ligne numérique. La mise en place d'entraînements spécialisés ou de méthodes qui peuvent aider à faire la correspondance entre les nombres et leur grandeur numérique analogique serait donc efficace à la réussite scolaire. Une bonne représentation mentale de l'espace et des doigts serait également corrélée avec des meilleures capacités en mathématiques. C'est pour cette raison que le laboratoire de Catherine Thevenot en Suisse travaille sur la mise au point d'un programme permettant aux enfants d'apprendre à utiliser cette stratégie de comptage sur les doigts. Cette stratégie peut être utilisée par certains enfants mais elle n'est pas toujours spontanée, et surtout son usage n'est pas toujours valorisé à l'école. Les recherches montrent pourtant que cette pratique permet non seulement d'automatiser la représentation des quantités mais aide aussi les enfants dans leurs apprentissages mathématiques. Utiliser ses mains, regarder ses doigts, toutes les expériences sensorielles liées aux quantités seraient le secret pour un encodage multiple permettant ainsi d'améliorer les apprentissages numériques (Gimbert, 2016). La cognition numérique a donc de diverses implications sur les plans pédagogiques et éducatif, mais aussi dans le domaine de la neuropsychologie. Si l'étude des patients cérébro-lésés nous apportent des connaissances fondamentales sur la façon dont notre cerveau perçoit les nombres, toutes ces connaissances peuvent être à l'inverse utilisées pour la rééducation de ces patients (Winter, Marghetis, et al., 2015).

Côté marketing, les propriétés numériques influencent-elles notre perception des prix ?

Dans une démarche plus appliquée, une question intéressante relevant des domaines du marketing et de l'économie est de savoir comment nos représentations numériques affectent notre

perception des prix et notre comportement de consommateur. Les nombres, qui sont quotidiennement présents dans différents aspects de notre vie, sont utiles dès que nous souhaitons acheter un produit. Si le consommateur pense avoir en main tous les indices déterminants pour prendre la décision d'acheter un produit, la façon dont un prix est présenté semble impacter sa décision (Coulter & Coulter, 2005a, 2010; Coulter & Norberg, 2009). La façon de comparer et de percevoir les prix ne se fait donc pas de façon complètement objective. De façon intéressante, dans l'étude de la perception des prix par les consommateurs, on retrouve les caractéristiques du traitement numérique. Comment nous représentons-nous les prix ? En faisant le lien avec le modèle de triple code de Dehaene (1992, voir section 1.1.1.3), des chercheurs proposent que la connaissance que nous avons des prix, stockée en mémoire épisodique, puisse prendre une forme nominale, qui correspond au prix exact du produit (encodage sous le code auditif ou visuel) ou prendre une forme relative, qui correspond au prix du produit dans un magasin précis en comparaison aux autres magasins (encodage sous le code analogique). Ce code analogique fait directement référence à la position relative des prix en comparaison à d'autres prix (plus cher, moins cher) (Dehaene, 1992; Monroe & Lee, 1999). Certains chercheurs préfèrent parler de magnitude des prix et proposent même que la représentation des prix des produits peut se faire de façon hiérarchisée sur une ligne numérique mentale des prix (Damay, 2008, Monroe & Lee, 1999; Zollinger, 2004). Bernard (2013) suggère que la perception d'un produit active une position sur cette ligne numérique de prix, et que cette activation soit dépendante également des croyances du consommateur envers la marque, l'enseigne et des caractéristiques du produit. Cette ligne mentale peut également servir à des fins de comparaison, puisqu'un produit activera un prix sur cette ligne qui fera office de prix de référence interne. Sur cette base, le consommateur pourra juger si l'écart entre le prix de référence interne et le prix affiché est acceptable ou non. Cette ligne permet donc d'ordonner différentes catégories de produits, mais aussi d'ordonner différents produits au sein d'une même catégorie (exemple : les DVD simples sont moins chers que les DVD collectors). Si les prix sont représentés sur une ligne mentale, on peut se demander si cette ligne mentale comme la ligne mentale des nombres est caractérisée par des effets de distance (difficulté à distinguer des prix proches) et de taille (la difficulté à discriminer les prix augmente avec le prix de l'objet). Dans le cas des soldes, Tversku et Kahneman (1981) ont montré que les consommateurs préféraient gagner 5$ sur un produit initialement affiché à 15$ plutôt qu'à 125$. Donc ce n'est pas la valeur absolue du rabais qui compte, mais bien la différence relative entre le prix soldé et le prix non-soldé. Pourtant, la somme qui est n'est pas dépensée ne change pas. Pour avoir l'impression de faire une bonne affaire, il semblerait donc que le consommateur se base sur une différence relative plutôt qu'absolue, de la même façon que lorsqu'il compare deux nombres. Plus la numérosité augmente, plus la distance entre deux items doit augmenter pour que la même différence soit perçue (Josephs, Giesler, & Silvera, 1994, Pelham,

Sumarta, & Myaskovsky, 1994). Les consommateurs ne prennent pas en compte ces informations lorsqu'ils évaluent un prix. Plus impressionnant, la distance physique entre le prix soldé et le prix de base influence également la perception que nous avons du rabais. Une plus grande distance physique (horizontale mais pas verticale) séparant les deux prix entraîne une plus grande distance numérique perçue entre les prix (Coulter & Norberg, 2009). La taille physique des chiffres aussi semble jouer un rôle puisque lorsque des observateurs doivent comparer deux prix, ils reconnaissent plus facilement le plus petit (ou le plus grand) si sa grandeur physique est congruente avec sa numérosité. Par exemple, le participant reconnaîtra plus rapidement le chiffre 2 dans cette paire « 3$ et 2$ » que le chiffre 6 dans cette paire « 7$ et 6$ » (Coulter & Coulter, 2005b). Pour conclure, la connaissance des propriétés numériques et de la perception numérique chez l'humain peut être un puissant facteur dans l'élaboration de stratégies économiques et marketing.

CONCLUSION GENERALE

Plutôt que de rechercher ce qui distingue les traitements des informations spatiales, numériques et temporelles, Walsh (2003) propose dans son modèle ATOM un système de traitement commun de magnitude pour ces différentes dimensions perceptives. Ce système commun servirait à guider nos mouvements.

Les travaux réalisés dans cette thèse ont montré que le traitement numérique impacte les paramètres temporels et spatiaux de la réponse saccadique, et ce même lorsque l'information numérique n'est a priori par pertinente pour effectuer la tâche saccadique. La quantité numérique semble donc être une information traitée par le système saccadique. Nous avons également montré que des variations de l'amplitude saccadique sont susceptibles d'influencer la perception de la taille d'un objet, suggérant un lien étroit entre les magnitudes motrice et perceptive.

Les études comportementales de la thèse apportent de nouvelles connaissances sur les conséquences sensori-motrices en réponse à des magnitudes numériques (axe 1) et sur l'influence de la magnitude motrice sur les magnitudes perceptives (axe 2).

Si les études de l'axe 1 enrichissent la littérature concernant l'influence du traitement numérique sur les paramètres moteurs de l'action, les études de l'axe 2 suggèrent que les magnitudes motrices reposent également sur ce système de magnitude commun, initialement dédié aux dimensions perceptives. Dans cette perspective, le système de magnitude commun pourrait être un élément clé dans la boucle perception-action.

Bibliographie

Agrillo, C., Dadda, M., Serena, G., & Bisazza, A. (2008). Do fish count? Spontaneous discrimination of quantity in female mosquitofish. *Animal Cognition*, *11*(3), 495–503. https://doi.org/10.1007/s10071-008-0140-9

Alahyane, N., Salemme, N., Urquizar, C., Cotti, J., Guillaume, A., Vercher, A., & Pélisson, D. (2007). Oculomotor plasticity: are mechanisms of adaptation for reactive and voluntary saccades separate? *Brain Research*, *1135*, 107–121.

Alahyane, N., Koene, A., & Pélisson, D. (2004). Transfer of adaptation from visually guided saccades to averaging saccades elicited by double visual targets. *European Journal of Neuroscience*, *20*(3), 827–836.

Alahyane, N., & Pélisson, D. (2005). Long-lasting modifications of saccadic eye movements following adaptation induced in the double-step target paradigm. *Learning and Memory*, *12*(4), 433–443. https://doi.org/10.1101/lm.96405

Andres, M., Davare, M., Pesenti, M., Olivier, E., & Seron, X. (2004). Number magnitude and grip aperture interaction. *NeuroReport*, *15*(18), 2773–2777.

Andres, M., Olivier, E., & Badets, A. (2008). Actions, Words, and Numbers. *Current Directions in Psychological Science*, *17*(5), 313–317. https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2008.00597.x

Andres, M., Ostry, D. J., Nicol, F., & Paus, T. (2008). Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, *44*(4), 414–419. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.007

Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2016). Number As a Primary Perceptual Attribute: A Review. *Perception*, *45*(1–2), 5–31. https://doi.org/10.1177/0301006615602599

Bächtold, D., Baumüller, M., & Brugger, P. (1998). Stimulus response compatibility in representational space. *Neuropsychologia*, *36*(8), 731–735. https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00002-5

Badets, A., Pesenti, M., & Olivier, E. (2010). Response–effect compatibility of finger–numeral configurations in arithmetical context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(1), 16–22.

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., Bidet-Ildei, C., & Pesenti, M. (2014). Influence of biological kinematics on abstract concept processing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *68*(3), 608–618. https://doi.org/10.1080/17470218.2014.964737

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

Badets, A., & Pesenti, M. (2010). Creating number semantics through finger movement perception. *Cognition*, *115*(1), 46–53. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.11.007

Badets, A., & Rensonnet, C. (2015). Une approche idéomotrice de la cognition. *L'Année Psychologique*, (December 2015), 1–45. https://doi.org/10.4074/S0003503315000238

Bahcall, D. O., & Kowler, E. (2000). The control of saccadic adaptation: Implications for the scanning of natural visual scenes. *Vision Research*, *40*(20), 2779–2796. https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00117-6

Bahill, A. T., Clark, M. R., & Stark, L. (1975). The main sequence, a tool for studying human eye movements. *Mathematical Biosciences*, *24*(3–4), 191–204. https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90075-9

Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–645. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639

Basso, G., Nichelli, P., Frassinetti, F., Pellegrino, G., & Patologia, D. (1996). Time perception in a neglected space. *NeuroReport*, *7*(13), 2111–2114. https://doi.org/10.1097/00001756-199609020-00009

Beauvillain, C., & Doré, K. (1998). Orthographic codes are used in integrating information from the parafovea by the saccadic computation system. *Vision Research*, *38*(1), 115–123. https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00127-2

Beauvillain, C., Doré, K., & Baudouin, V. (1996). The "center of gravity" of words: Evidence for an effect of the word-initial letters. *Vision Research*, *36*(4), 589–603. https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00141-7

Becker, W. (1989). The neurobiology of saccadic eye movements. Metrics. In *Reviews of oculomotor research* (Vol. 3, p. 13).

Becker, W., & Jürgens, R. (1979). An analysis of the saccadic system by means of double step stimuli. *Vision Research*, *19*(9), 967–983.

Berkeley, G. (1709). *An Essay Towards a New Theory of Vision.* (A. Rhames, Ed.).

Bernard, Y. (2013). Et si les prix n'étaient pas toujours des chiffres dans la tête du consommateur ? L'apport de la ligne numérique mentale.

Binda, P., Morrone, M. C., & Bremmer, F. (2012). Saccadic Compression of Symbolic Numerical Magnitude. *PLoS ONE*, *7*(11), e49587. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049587

Binda, P., Morrone, M. C., Ross, J., & Burr, D. C. (2011). Underestimation of perceived number at the time of saccades. *Vision Research*, *51*(1), 34–42. https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.09.028

Bogale, B. A., Kamata, N., Mioko, K., & Sugita, S. (2011). Quantity discrimination in jungle crows, Corvus macrorhynchos. *Animal Behaviour*, *82*(4), 635–641. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.05.025

Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring: unterstanding time through spatial metaphors. *Cognition*, *75(1)*, 1–28.

Bosco, A., Lappe, M., & Fattori, P. (2015). Adaptation of Saccades and Perceived Size after Trans-Saccadic Changes of Object Size. *Journal of Neuroscience*, *35*(43), 14448–14456. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0129-15.2015

Bridgeman, B., Hendry, D., & Stark, L. (1975). Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movements. *Vision Research*, *15*(6), 719–722.

Bruno, A., & Morrone, M. C. (2007). Influence of saccadic adaptation on spatial localization : Comparison of verbal and pointing reports. *Journal of Vision*, *7*(5), 16.1-16.13. https://doi.org/10.1167/7.5.16

Brysbaert, M. (2018). Numbers and Language: What's New in the Past 25 Years? *Heterogeneity of Function in Numerical Cognition*, 3–26. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811529-9.00001-7

Brysbaert, M., & Holloway, R. (2014). Number recognition in different formats. In *Handbook of mathematical cognition* (p. 23).

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

Bulf, H., de Hevia, M. D., & Macchi Cassia, V. (2016). Small on the left, large on the right: Numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science*, *19*(3), 394–401. https://doi.org/10.1111/desc.12315

Bulf, H., Macchi Cassia, V., & de Hevia, M. D. (2014). Are numbers, size and brightness equally efficient in orienting visual attention? Evidence from an eye-tracking study. *PloS One*, *9*(6), e99499. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099499

Burr, D. C., Ross, J., Binda, P., & Morrone, M. C. (2010). Saccades compress space , time and number. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(12), 528–533. https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.005

Burr, D., & Ross, J. (2008). A Visual Sense of Number. *Current Biology*, *18*(6), 425–428. https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.02.052

Camos, V., & Tillmann, B. (2008). Discontinuity in the enumeration of sequentially presented auditory and visual stimuli. *Cognition*, *107*(3), 1135–1143. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.11.002

Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2006). Shared System for Ordering Small and Large Numbers in and Humans Monkeys. *Psychological Science*, *17*(5), 401–406. https://doi.org/10.1111/j.1467-

9280.2006.01719.x

Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007). Basic math in monkeys and college students. *PLoS Biology*, *5*(12), e328. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050328

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., Freeman, E. D., & Cipolotti, L. (2009). Dissociations and interactions between time, numerosity and space processing. *Neuropsychologia*, *47*(13), 2732–2748. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.024

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

Cattell, J. M. (1885). Über die Zeit der Erkennung und Benennung von Schriftzeichen, Bildern und Farben [The time it takes to recognize and name letters, pictures, and colors]. *Philosophische Studien*, *2*, 635–650.

Chagas, P. P., Dotan, D., Piazza, M., & Dehaene, S. (2017). Finger Tracking Reveals the Covert Stages of Mental Arithmetic. *Open Mind : Discoveries in Cognitive Science*, *1*(1), 30–41. https://doi.org/10.1162/opmi

Cheng, X., Ge, H., Andoni, D., Ding, X., & Fan, Z. (2015). Composite body movements modulate numerical cognition : evidence from the motion-numerical compatibility effect. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1692. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01692

Chochon, F., Cohen, L., van de Moortele, P. F., & Dehaene, S. (1999). Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(6), 617–630. https://doi.org/10.1162/089892999563689

Coëffé, C., & O'regan, J. K. (1987). Reducing the influence of non-target stimuli on saccade accuracy: Predictability and latency effects. *Vision Research*, *27*(2), 227–240. https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90185-4

Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Kaas, A., Henik, A., & Goebel, R. (2007). Notation-Dependent and -Independent Representations of Numbers in the Parietal Lobes. *Neuron*, *53*(2), 307–314. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.12.025

Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Linden, D. D. E. J., 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

Collins, T., Doré-Mazars, K., & Lappe, M. (2007). Motor space structures perceptual space: Evidence from human saccadic adaptation. *Brain Research*, *1172*(1), 32–39. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.07.040

Collins, T., Vergilino-Perez, D., Beauvillain, C., & Doré-Mazars, K. (2007). Saccadic adaptation depends on object selection: Evidence from between- and within-object saccadic eye movements. *Brain Research*, *1152*, 95–105. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.03.025

Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(3), 201. https://doi.org/10.1038/nrn755

Coren, S., & Hoenig, P. (1972). Effect of Non-Target Stimuli upon Length of Voluntary Saccades. *Perceptual and Motor Skills*, *34*(2), 499–508. https://doi.org/10.2466/pms.1972.34.2.499

Corinna, S., & Fred, W. (2016). Eye movements reveal mental looking through time. *Cognitive Science*, *40*(7), 1648–1670.

Cotti, J., Guillaume, A., Alahyane, N., Pelisson, D., & Vercher, J. L. (2007). Adaptation of voluntary saccades, but not of reactive saccades, transfers to hand pointing movements. *Journal of Neurophysiology*, *98*(2), 602–612. https://doi.org/10.1152/jn.00293.2007

Coull, J. T., & Nobre, A. C. (1998). Where and When to Pay Attention : The Neural Systems for Directing Attention to Spatial Locations and to Time Intervals as Revealed by Both PET and fMRI. *Journal of Neuroscience*, *18*(18), 7426–7435.

Coulter, K. S., & Coulter, R. A. (2005a). Size Does Matter : The Effects of Magnitude Representation Congruency on Price Perceptions and Purchase Likelihood. *Journal of Consumer Psychology*, *15*(1), 64–76.

Coulter, K. S., & Coulter, R. A. (2005b). Size Does Matter: The Effects of Magnitude Representation Congruency on Price Perceptions and Purchase Likelihood. *Journal of Consumer Psychology*, *15*(1), 64–76. https://doi.org/10.1207/s15327663jcp1501_9

Coulter, K. S., & Coulter, R. A. (2010). Small Sounds , Big Deals : Phonetic Symbolism Effects in Pricing. *Journal of Consumer Research*, *37*(2), 315–328. https://doi.org/10.1086/651241

Coulter, K. S., & Norberg, P. A. (2009). The effects of physical distance between regular and sale prices on numerical difference perceptions. *Journal of Consumer Psychology*, *19*, 144–157. https://doi.org/10.1016/j.jcps.2009.02.008

Cowey, A., & Rolls, E. T. (1974). Human cortical magnification factor and its relation to visual acuity. *Experimental Brain Research*, *21*(5), 447–454. https://doi.org/10.1007/BF00237163

Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., & Umiltà, C. (1999). Action for perception: A motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(6), 1673–1692. https://doi.org/10.1037/0096-1523.25.6.1673

Creem-regehr, S. H., & Kunz, B. R. (2010). Perception and action. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *1*(6), 800–810. https://doi.org/10.1002/wcs.82

Crollen, V., Grade, S., Pesenti, M., & Dormal, V. (2013). A common metric magnitude system for the perception and production of numerosity, length, and duration. *Frontiers in Psychology*, *4*(JUL),

1–11. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00449

Culham, J. C., & Valyear, K. F. (2006). Human parietal cortex in action. *Current Opinion in Neurobiology*, *16*(2), 205–212. https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.005

Daar, M., & Pratt, J. (2008). Digits affect actions: The SNARC effect and response selection. *Cortex*, *44*(4), 400–405. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.12.003

de Hevia, M. D., Girelli, L., Addabbo, M., & Cassia, V. M. (2014). Human infants' preference for left-to-right oriented increasing numerical sequences. *PLoS ONE*, *9*(5), e96412. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096412

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. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1–2), 1–42.

Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(1), 47–68.

Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths: quinze ans après.* (Odile Jaco).

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology. General*, *122*(3), 371–396. https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371

Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*.

Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*(3), 626–641. https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.3.626

Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*(2), 218–224. https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.008

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

DeLong, A. . (1981). Phenomenological space-time: toward an experiential relativity. *Science*, *213*(4508), 681–683.

Deubel, H. (1995). Is saccade adaptation context-specific? In *Eye Movement Research: Mechanisms, Processes and Applications* (pp. 77–187).

Deubel, H., Wolf, W., & Hauske, G. (1984). The Evaluation of the Oculomotor Error Signal. In *Advances in Psychology* (Vol. 22, pp. 55–62). https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61818-X

Deubel, H., Wolf, W., & Hauske, G. (1986). Adaptive gain control of saccadic eye movements. *Human Neurobiology*, *5*(4), 245–253.

Di Luca, S., Granà, A., Semenza, C., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Finger–digit compatibility in Arabic numeral processing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*(9), 1648–1663.

Didino, D., Breil, C., & Knops, A. (2019). The influence of semantic processing and response latency on the SNARC effect. *Acta Psychologica*, *196*(April), 75–86. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.04.008

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.

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

Dotan, D., & Dehaene, S. (2013). How do we convert a number into a finger trajectory? *Cognition*, *129*(3), 512–529. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.07.007

Eger, E., Michel, V., Thirion, B., Amadon, A., Dehaene, S., & Kleinschmidt, A. (2009). Deciphering Cortical Number Coding from Human Brain Activity Patterns. *Current Biology*, *19*(19), 1608–1615. https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.08.047

Faillenot, I., Decety, J., & Jeannerod, M. (1998). Human brain activity related to the perception of spatial features of objects. *NeuroImage*, *10*, 114–124.

Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(7), 307–314. https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002

Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & D'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: Evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition*. https://doi.org/10.1080/135467996387552

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.

Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers : evidence from the SNARC effect, *65*(4), 250–259.

Findlay, J. M. (1982). Global visual processing for saccadic eye movements. *Vision Research*, *22*(8), 1033–1045. https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90040-2

Findlay, J. M., & Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(4), 661–674. https://doi.org/10.1017/S0140525X99002150

Fischer, B., & Ramsperger, E. (1984). Human express saccades: extremely short reaction times of goal directed eye movements. *Experimental Brain Research*, *57*(1), 191–195. https://doi.org/10.1007/BF00231145

Fischer, M. H. (2008). Finger counting habits modulate spatial-numerical associations. *Cortex*, *44*(4), 386–392. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.004

Fischer, M. H., & Campens, H. (2009). Pointing to numbers and grasping magnitudes. *Experimental Brain Research*, *192*(1), 149–153. https://doi.org/10.1007/s00221-008-1622-3

Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, *6*(6), 555–556. https://doi.org/10.1038/nn1066

Fischer, M. H., Warlop, N., Hill, R. L., & Fias, W. (2004). Oculomotor Bias Induced by Number Perception. *Experimental Psychology (Formerly "Zeitschrift Für Experimentelle Psychologie")*, *51*(2), 91–97. https://doi.org/10.1027/1618-3169.51.2.91

Fischer, U., Fischer, M. H., Huber, S., Strauß, S., & Moeller, K. (2018). The influence of number magnitude on continuous swiping movements. *Journal of Numerical Cognition*, *4*(2), 297–316. https://doi.org/10.5964/jnc.v4i2.135

Frost, D., & Pöppel, E. (1976). Different programming modes of human saccadic eye movements as a function of stimulus eccentricity: Indications of a functional subdivision of the visual field. *Biological Cybernetics*, *23*(1), 39–48. https://doi.org/10.1007/BF00344150

Fuchs, A. F. (1976). The neurophysiology of saccades. In *Eye movements and psychological processes* (pp. 39–53).

Gallese, V., & Lakoff, G. (2005). The brain's concepts: the role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*, *22*(3–4), 455–479. https://doi.org/10.1080/02643290442000310

Gallivan, J. ., & Culham, J. C. (2015). Neural coding within human brain areas involved in actions. *Current Opinion in Neurobiology*, *33*, 141–149.

Gandini, D., Lemaire, P., & Dufau, S. (2008). Older and younger adults' strategies in approximate quantification. *Acta Psychologica*, *129*(1), 175–189. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.05.009

Ganor-Stern, D., & Goldman, R. (2015). Reaching towards an end: Numerical end and distance effects in motor movements. *Journal of Cognitive Psychology*, *27*(4), 490–498. https://doi.org/10.1080/20445911.2014.950662

Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2012). The interplay between nonsymbolic number and its continuous visual properties. *Journal of Experimental Psychology: General*, *141*(4), 642–648. https://doi.org/10.1037/a0026218

Gelman, R., & Butterworth, B. (2005). Number and language: How are they related? *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(1), 6–10. https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.11.004

Gentilucci, M., Benuzzi, F., Gangitano, M., & Grimaldi, S. (2001). Grasp with hand and mouth: A kinematic study on healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*, *86*(4), 1685–1699.

Gentilucci, M., & Gangitano, M. (1998). Influence of automatic word reading on motor control. *European Journal of Neuroscience*, *10*(2), 752–756. https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.1998.00060.x

Gevers, W., Ratinckx, E., De Baene, W., & Fias, W. (2006). Further evidence that the SNARC effect is processed along a dual-route architectures: Evidence from the lateralized readiness potential. *Experimental Psychology*, *53*(1), 58–68. https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.1.58

Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Journal of Hepatology*, *38*(3), B87–B95. https://doi.org/10.1016/S0

Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B., & Fias, W. (2006). Numbers and space: A computational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(1), 32–44. https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.1.32

Gillen, C., Weiler, J., & Heath, M. (2013). Stimulus-driven saccades are characterized by an invariant undershooting bias: No evidence for a range effect. *Experimental Brain Research*, *230*(2), 165–174. https://doi.org/10.1007/s00221-013-3640-z

Gimbert, F. (2016). *L'appréhension des quantités par la vision ou le toucher : son développement et son rôle dans les apprentissages numériques chez l'enfant*. Université Grenoble Alpes.

Glover, S., Rosenbaum, D. A., Graham, J., & Dixon, P. (2004). Grasping the meaning of words. *Experimental Brain Research*, *154*(1), 103–108. https://doi.org/10.1007/s00221-003-1659-2

Goodale, M.A, & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*(1), 20–25.

Goodale, M. A., Meenan, J. P., Bülthoff, H. H., Nicolle, D. A., Murphy, K. J., & Racicot, C. I. (1994). Separate neural pathways for the visual analysis of object shape in perception and prehension. *Current Biology*, *4*(7), 604–610. https://doi.org/10.1016/S0960-9822(00)00132-9

Gracia-Bafalluy, M., & Noel, M. P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, *44*(4), 368–375.

Grade, S., Badets, A., & Pesenti, M. (2017). Influence of finger and mouth action observation on random number generation: an instance of embodied cognition for abstract concepts. *Psychological Research*, *81*(3), 538–548. https://doi.org/10.1007/s00426-016-0760-7

Grefkes, C., & Fink, G. R. (2005). The functional organization of the intraparietal sulcus in humans and monkeys. *Journal of Anatomy*, *207*(1), 3–17.

Gunderson, E. A., Ramirez, G., Beilock, S. L., & Levine, S. C. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge: The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, *48*(5), 1229–1241. https://doi.org/10.1037/a0027433

Hallet, P. E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Research*, *18*(10), 1279–1296.

Hartmann, M., Martarelli, C. S., Mast, F. W., & Stocker, K. (2014). Eye movements during mental time travel follow a diagonal line. *Consciousness and Cognition*, *30*, 201–209. https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.09.007

Hartmann, M., & Mast, F. W. (2017). Loudness counts: Interactions between loudness, number magnitude, and space. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(7), 1305–1322. https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1182194

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

Hesse, P. N., Fiehler, K., & Bremmer, F. (2016). SNARC Effect in Different Effectors. *Perception*, *45*(1–2), 180–195. https://doi.org/10.1177/0301006615614453

Holmes, K. J., Ayzenberg, V., & Lourenco, S. F. (2016). Gamble on gaze: Eye movements reflect the numerical value of blackjack hands. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*(6), 1974–1981. https://doi.org/10.3758/s13423-016-1055-0

Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, *73*(4), 512–526. https://doi.org/10.1007/s00426-009-0234-2

Hopp, J. J., & Fuchs, A. F. (2004). The characteristics and neuronal substrate of saccadic eye movement plasticity. *Progress in Neurobiology*, *72*(1), 27–53. https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2003.12.002

Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between Number and Space in Parietal Cortex, *6*(6), 435–448. https://doi.org/10.1038/nrn1684

Hung, Y. hui, Hung, D. L., Tzeng, O. J. L., & Wu, D. H. (2008). Flexible spatial mapping of different notations of numbers in Chinese readers. *Cognition*, *106*(3), 1441–1450. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.04.017

Irwin, D. E., & Thomas, L. E. (2007). The effect of saccades on number processing. *Perception and Psychophysics*, *69*(3), 450–458. https://doi.org/10.3758/BF03193765

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

Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Number Processing and Quantitative Representation of Numbers: Evidence from the SNARC Effect. *Memory & Cognition*, *32*(4), 662–673.

Itti, L., & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research*, *40*(10–12), 1489–1506.

Izard, V., Pica, P., Spelke, E., & Dehaene, S. (2008). Comment les nombres se répartissent dans l'espace: Une intuition originelle logarithmique. *Medecine/Sciences*, *24*(12), 1014–1016.

Josephs, R. A., Giesler, R. B., & Silvera, D. H. (1994). Judgment by quantity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *123*(1), 21.

Kadosh, R. C., Henik, A., & Rubinsten, O. (2008). Are Arabic and Verbal Numbers Processed in Different Ways? *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *34*(6), 1377–1391. https://doi.org/10.1037/a0013413

Kapoula, Z. (1985). Evidence for a Range Effect Saccadic System. *Vision Research*, *25*(8), 1155–1157.

Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkmann, J. (1949). The Discrimination of Visual Number. *The American Journal of Psychology*, *62*(4), 498–525. https://doi.org/10.2307/1418556

Klein, E., Huber, S., Nuerk, H., & Moeller, K. (2014). Operational momentum affects eye fixation behaviour. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(8), 1614–1625. https://doi.org/10.1080/17470218.2014.902976

Klingenhoefer, S., & Bremmer, F. (2011). Saccadic suppression of displacement in face of saccade adaptation. *Vision Research*, *51*(8), 881–889.

Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science (New York, N.Y.)*, *324*(5934), 1583–1585. https://doi.org/10.1126/science.1171599

Kommerell, G., Olivier, D., & Theopold, H. (1976). Adaptive programming of phasic and tonic components in saccadic eye movements. Investigations in patients with abducens palsy. *Investigative Ophthalmology*, *15*(8), 657–660.

Lachmair, M., Cress, U., Fissler, T., Kurek, S., Leininger, J., & Nuerk, H. C. (2017). Music-space associations are grounded, embodied and situated: examination of cello experts and non-musicians in a standard tone discrimination task. *Psychological Research*, 1–13. https://doi.org/10.1007/s00426-017-0898-y

Lachmair, M., Dudschig, C., De, I., & Kaup, B. (2014). Relating numeric cognition and language processing : Do numbers and words share a common representational platform ? *Acta Psychologica*, *148*, 107–114. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.12.004

Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). The metaphorical structure of the human conceptual system. *Cognitive Science*, *4*(2), 195–208. https://doi.org/10.1016/S0364-0213(80)80017-6

Leibovich, T., & Ansari, D. (2016). The symbol-grounding problem in numerical cognition: A review of theory, evidence, and outstanding questions. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *70*(1), 12–23. https://doi.org/10.1037/cep0000070

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

Leigh, R. J., & Zee, D. S. (2006). *The neurology of eye movements.* (Philadelph).

Lévy-Schoen, A. (1969). Détermination et latence de la réponse oculomotrice à deux stimulus simultanés ou successifs selon leur excentricité relative. *L'année Psychologique*, *69*(2), 373–392. https://doi.org/10.3406/psy.1969.27671

Li, X., Logan, G. D., & Zbrodoff, N. J. (2010). Where do we look when we count? The role of eye movements in enumeration. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *72*(8), 2087–2095. https://doi.org/10.3758/APP

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), 1400–1409. https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1400

Loetscher, T., & Nicholls, M. E. R. (2010). Eye position predicts what number you have in mind. *Current Biology*, *20*(6), R264–R265.

Loetscher, T., Schwarz, U., Schubiger, M., & Brugger, P. (2008). Head turns bias the brain's internal random generator. *Current Biology*, *18*(2), R60–R62. https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.015

Maloney, E. A., Risko, E. F., Preston, F., Ansari, D., & Fugelsang, J. (2010). Challenging the reliability and validity of cognitive measures: The case of the numerical distance effect. *Acta Psychologica*, *134*(2), 154–161.

Mandler, G., & Shebo, B. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, *111*(1).

Martarelli, C. S., Mast, F. W., & Hartmann, M. (2017). Time in the eye of the beholder: Gaze position reveals spatial-temporal associations during encoding and memory retrieval of future and past. *Memory and Cognition*, *45*(1), 40–48. https://doi.org/10.3758/s13421-016-0639-2

McLaughlin, S. (1967). Parametric adjustment in saccadic eye movements. *Perception & Psychophysics*, *2*(8), 359–362.

McPeek, R. M., & Keller, E. L. (2002). Saccade target selection in the superior colliculus during a visual search task. *Journal of Neurophysiology*, *88*(4), 2019–2034.

McSorley, E., & Findlay, J. M. (2003). Saccade target selection in visual search: Accuracy improves when more distractors are present. *Journal of Vision*, *3*(11), 20. https://doi.org/10.1167/3.11.20

Milner, A. D. (2017). How do the two visual streams interact with each other? *Experimental Brain Research*, *235*(5), 1297–1308. https://doi.org/10.1007/s00221-017-4917-4

Mock, J., Huber, S., Klein, E., & Moeller, K. (2016). Insights into numerical cognition: considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research*, *80*(3), 334–359. https://doi.org/10.1007/s00426-015-0739-9

Monroe, K. B., & Lee, A. Y. (1999). Remembering Versus Knowing: Issues in Buyers' Processing of

Price Information. *Journal of the Academy of Marketing Science*, *27*(2), 207–225.

Morrone, M. C., Ross, J., & Burr, D. C. (2009). Apparent Position of Visual Targets during Real and Simulated Saccadic. *The Journal of Neuroscience*, *17*(20), 7941–7953. https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01101-3

Moyer, R. S., & Landauer, T. . (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, *215*(5109), 1519.

Myachykov, A., Cangelosi, A., Ellis, R., & Fischer, M. H. (2015). The oculomotor resonance effect in spatial-numerical mapping. *Acta Psychologica*, *161*, 162–169. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.09.006

Myachykov, A., Ellis, R., Cangelosi, A., & Fischer, M. H. (2016). Ocular drift along the mental number line. *Psychological Research*, *80*(3), 379–388. https://doi.org/10.1007/s00426-015-0731-4

Nieder, A. (2005). Counting on neurons: The neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*(3), 177–190. https://doi.org/10.1038/nrn1626

Nieder, A., & Miller, E. K. (2004). Coding of Cognitive Magnitude. *Neuron*, *37*(1), 149–157. https://doi.org/10.1016/s0896-6273(02)01144-3

Noto, C. T., Watanabe, S., Fuchs, A. F., Christopher, T., Watanabe, S., & Char-, A. F. F. (1999). Characteristics of Simian Adaptation Fields Produced by Behavioral Changes in Saccade Size and Direction. *Journal of Neurophysiology*, *81*(6), 2798–2813.

Nuerk, H., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The Universal SNARC Effect The Association between Number Magnitude and Space is Amodal. *Experimental Psychology*, *52*(3), 187–194. https://doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.187

Nuthmann, A., Vitu, F., Engbert, R., & Kliegl, R. (2016). No evidence for a saccadic range effect for visually guided and memory-guided Saccades in simple saccade-targeting tasks. *PLoS ONE*, *11*(9), e0162449. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162449

Olivier, E., Davare, M., Andres, M., & Fadiga, L. (2007). Precision grasping in humans: from motor control to cognition. *Current Opinion in Neurobiology*, *17*(6), 644–648. https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.01.008

Ottes, F. P., Gisbergen, J. A. M., & Eggermont, J. J. (1984). Metrics of saccade responses to visual double stimuli: two different modes. *Vision Research*, *24*(10), 1169–1179.

Piaget. (1965). *The child's conception of number.* (New York:).

Piazza, M., & Eger, E. (2016). Neuropsychologia Neural foundations and functional speci fi city of number representations. *Neuropsychologia*, *83*, 257–273. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.025

Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2007). A Magnitude Code Common to Numerosities and Number Symbols in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, *53*(2), 293–305.

https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022

Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and Approximate Arithmetic in an Amazonian Indigene Group. *Science*, *306*(5695), 499–503. https://doi.org/10.1126/science.1102085

Pierrot-deseilligny, C., Milea, D., & Mu, M. (2004). Eye movement control by the cerebral cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *17*(1), 17–25. https://doi.org/10.1097/01.wco.0000113942.12823.e0

Pierrot-Deseilligny, C., Rivaud, S., Gaymard, B., Muri, R., & Vermersch, A.-I. (1995). Cortical control of saccades in man. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, *37*(5), 557–567.

Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D., & Le Bihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, *14*(5), 1013–1026.

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

Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*, 3–25.

Pressigout, A., Charvillat, A., Mersad, K., & Doré-Mazars, K. (2018). Time dependency of the SNARC effect for different number formats: evidence from saccadic responses. *Psychological Research*, 1–11. https://doi.org/10.1007/s00426-018-1010-y

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

Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., & Williams, S. M. (2005). *Neurosciences, 3e édition.* Paris : De Boeck Université.

Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, *79*(2), 375–394. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x

Ren, P., Nicholls, M. E. R., Ma, Y. ye, & Chen, L. (2011). Size matters: Non-Numerical magnitude affects the spatial coding of response. *PLoS ONE*, *6*(8), e23553. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023553

Reynvoet, B., & Sasanguie, D. (2016). The symbol grounding problem revisited: A thorough evaluation of the ans mapping account and the proposal of an alternative account based on symbol-symbol associations. *Frontiers in Psychology*, *7*(OCT), 1–11. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01581

Riemer, M., Diersch, N., Bublatzky, F., & Wolbers, T. (2016). Space, time, and numbers in the right

posterior parietal cortex: Differences between response code associations and congruency effects. *NeuroImage*, *129*, 72–79. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.01.030

Rinaldi, L., & Girelli, L. (2017). Commentary: From “sense of number” to “sense of magnitude” - The role of continuous magnitudes in numerical cognition. *Frontiers in Psychology*, *8*, 652. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00652

Robinson, D. A. (1964). The mechanics of human saccadic eye movement. *The Journal of Physiology*, *174*(2), 245–264.

Roettger, T. B., & Domahs, F. (2015). Grammatical number elicits SNARC and MARC effects as a function of task demands. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *68*(6), 1231–1248. https://doi.org/10.1080/17470218.2014.979843

Ross, J., Morrone, M. C., & Burr, D. C. (1997). Compression of Visual Space Before Saccades. *Nature*, *386*(6625), 598–601.

Ross, L. E., & Ross, S. M. (1980). Saccade latency and warning signals: Stimulus onset, offset, and change as warning events. *Perception & Psychophysics*, *27*(3), 251–257. https://doi.org/10.3758/BF03204262

Ross, S. M., & Ross, L. E. (1981). Saccade latency and warning signals: Effects of auditory and visual stimulus onset and offset. *Perception & Psychophysics*, *29*(5), 429–437. https://doi.org/10.3758/BF03207356

Rossetti, Y, Jacquin-Courtois, S., Rode, G., Ota, H., Michel, C., & Boisson, D. (2004). Does action make the link between number and space representation? *Psychological Science*, *15*(6), 426–430.

Rossetti, Y., & Pisella, L. (2002). Several “vision for action” systems: a guide to dissociating and integrating dorsal and ventral functions (Tutorial). *Attention and Performance XIX; Common Mechanisms in Perception and Action.*

Rugani, R., & de Hevia, M.-D. (2017). Number-space associations without language: Evidence from preverbal human infants and non-human animal species. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*(2), 352–369. https://doi.org/10.3758/s13423-016-1126-2

Rugani, R., & Sartori, L. (2016). Numbers in Action. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*(July), 2014–2017. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00388

Rugani, R., Vallortigara, G., Priftis, K., & Regolin, L. (2017). Experimental Evidence From Newborn Chicks Enriches Our Knowledge on Human Spatial–Numerical Associations. *Cognitive Science*, *41*(8), 2275–2279. https://doi.org/10.1111/cogs.12523

Ruiz Fernández, S., Rahona, J. J., Hervás, G., Vázquez, C., & Ulrich, R. (2011). Number magnitude determines gaze direction: Spatial-numerical association in a free-choice task. *Cortex*, *47*(5), 617–620. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.10.006

Saj, A., Fuhrman, O., Vuilleumier, P., & Boroditsky, L. (2014). Patients with left spatial neglect also

neglect the “left side” of time. *Psychological Science*, *25*(1), 207–214. https://doi.org/10.1177/0956797612475222

Salvaggio, S., Masson, N., Andres, M., Salvaggio, S., Masson, N., & Andres, M. (2018). Journal of Experimental Psychology : Learning , Memory , and Cognition Eye Position Reflects the Spatial Coding of Numbers During Magnitude Comparison Eye Position Reflects the Spatial Coding of Numbers During Magnitude Comparison. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*.

Saslow, M. G. (1967). M. G. Saslow, “Effects of Components of Displacement-Step Stimuli Upon Latency for Saccadic Eye Movement,” J. Opt. Soc. Am. 57, 1024-1029 (1967). *Journal of the Optical Society of American*, *57*(8), 1024–1029. https://doi.org/https://doi.org/10.1364/JOSA.57.001024

Schira, M. M., Wade, A. R., & Tyler, C. W. (2007). Two-Dimensional Mapping of the Central and Parafoveal Visual Field to Human Visual Cortex. *Journal of Neurophysiology*, *97*(6), 4284–4295. https://doi.org/10.1152/jn.00972.2006

Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line: comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & Psychophysics*, *66*(4), 651–664. https://doi.org/10.3758/BF03194909

Shaki, S., & Fischer, M. H. (2014). Random walks on the mental number line. *Experimental Brain Research*, *232*(1). https://doi.org/10.1007/s00221-013-3718-7

Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(2), 328–331. https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.328

Shamma, S. (2001). On the role of space and time in auditory. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(8), 340–348.

Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A Review of Contemporary Ideomotor Theory. *Psychological Bulletin*, *136*(6), 943–974. https://doi.org/10.1037/a0020541

Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, *75*(2), 428–444. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x

Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2017). Development of Numerical Estimation in Young Children Author (s): Robert S . Siegler and Julie L . Booth Published by : Wiley on behalf of the Society for Research in Child Development Stable URL : http://www.jstor.org/stable/3696649, *75*(2), 428–444.

Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The Development of Numerical Estimation: Evidence for Multiple Representations of Numerical Quantity. *Psychological Science*, *14*(3), 237–243. https://doi.org/10.1111/1467-9280.02438

Siegler, R. S., & Ramani, G. B. (2008). Playing linear numerical board games promotes low-income

children's numerical development. *Developmental Science*, *11*(5), 655–661. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00714.x

Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, *81*(1), 174.

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.

Song, J. H., & Nakayama, K. (2008). Numeric comparison in a visually-guided manual reaching task. *Cognition*, *106*(2), 994–1003. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.03.014

Stocker, K. (2012). The time machine in our mind. *Cognitive Science*, *36*(3), 385–420. https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2011.01225.x

Straube, A., Fuchs, A. F., Usher, S., Robinson, F. R., Fuchs, A. F., & Usher, S. (1997). Characteristics of Saccadic Gain Adaptation in Rhesus Macaques. *Journal of Neurophysiology*, *77*(2), 874–895.

Sur, M., & Leamey, C. A. (2001). Development and plasticity of cortical areas and networks. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(4), 251.

Thevenot, C. (2014). La relation entre doigts et nombres: Que peuvent nous apprendre les enfants présentant une hémiplégie? *ANAE - Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'Enfant*, *26*(128), 47–52.

Thioux, M., Pesenti, M., Costes, N., Volder, A. De, & Seron, X. (2005). Task-independent semantic activation for numbers and animals. *Cognitive Brain Research*, *24*(2), 284–290. https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.02.009

Tudusciuc, O., & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *104*(36), 14513–14518. https://doi.org/0705495104 [pii]\r10.1073/pnas.0705495104

Tversku, A., & Kahneman, D. (1981). The Framing of Decisions and the Psychology of Choice. *Science*, *211*(4481), 453–458.

Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, *139*(2), 352–402. https://doi.org/10.1037/a0028446

Valsecchi, M., Gegenfurtner, K. R., Valsecchi, M., & Gegenfurtner, K. R. (2016). Dynamic Re-calibration of Perceived Size in Fovea and Periphery through Predictable Size Changes Report Dynamic Re-calibration of Perceived Size in Fovea and Periphery through Predictable Size Changes. *Current Biology*, *26*(1), 59–63. https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.10.067

Van der Stigchel, S., & Nijboer, T. C. W. (2011). The global effect: what determines where the eyes land? *Journal of Eye Movement Research*, *4*(2), 1–13. https://doi.org/10.16910/jemr.4.2.3

Van Essen, D. C., Newsome, W. T., & Maunsell, J. H. R. (1984). the Visual Field Representation in

Striate Cortex of the Macaque Monkey : Asymmetries , and Individual. *Vision Research*, *24*(5), 429–448.

Vergilino, D., & Beauvillain, C. (2001). Reference frames in reading: Evidence from visually and memory-guided saccades. *Vision Research*, *41*(25–26), 3547–3557. https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00225-5

Viarouge, A., Hubbard, E. M., & McCandliss, B. D. (2014). The cognitive mechanisms of the SNARC effect: An individual differences approach. *PLoS ONE*, *9*(4), e95756. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095756

Vitu, F. (1991). The existence of a center of gravity effect during reading. *Vision Research*, *31*(7–8), 1289–1313. https://doi.org/10.1016/0042-6989(91)90052-7

Vitu, F. (2008). About the global effect and the critical role of retinal eccentricity : Implications for eye movements in reading. *Journal of Eye Movement Research*, *2*(3), 1–18.

Walker, R., Deubel, H., Schneider, W. X., & Findlay, J. M. (1997). Effect of Remote Distractors on Saccade Programming: Evidence for an Extended Fixation Zone. *Journal of Neurophysiology*, *78*(2), 1108–1119. https://doi.org/10.1152/jn.1997.78.2.1108

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

Watson, D. G., Maylor, E. A., & Bruce, L. A. M. (2007). The Role of Eye Movements in Subitizing and Counting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*(6), 1389–1399. https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1389

Waugh, L. R. (1982). Marked and unmarked: A choice between unequals in semiotic structure. *Semiotica*, *38*(3–4), 299–318. https://doi.org/10.1515/semi.1982.38.3-4.299

Wenke, D., & Haggard, P. (2009). How voluntary actions modulate time perception. *Experimental Brain Research*, *196*(3), 311–318. https://doi.org/10.1007/s00221-009-1848-8

Whalen, J., Gallister, C. R., & Gelman, R. (2012). *Nonverbal counting in humans: The psychophysics of number representation*. *Psychological Science* (Vol. 10).

Winter, B., Marghetis, T., & Matlock, T. (2015). Of magnitudes and metaphors: Explaining cognitive interactions between space, time, and number. *Cortex*, *64*, 209–224. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.10.015

Winter, B., Matlock, T., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2015). Mental number space in three dimensions. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *57*, 209–219. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.005

Wood, G., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2006a). Crossed hands and the SNARC effect: A failure to replicate Dehaene, Bossini and Giraux (1993). *Cortex*, *42*(8), 1069–1079. https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70219-3

Wood, G., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2006b). Variability of the SNARC effect: Systematic interindividual differences or just random error? *Cortex*, *42*(8), 1119–1123. https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70223-5

Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. H. (2008). On the cognitive link between space and number: a meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology Science Quarterly*, *4*(4), 489–525. https://doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.187

Wurtz, R. H. (2009). Superior colliculus. In L. R. Squir (Ed.), *Encyclopedia of Neuroscience* (pp. 627–634). Oxford : Academia Press.

Wurtz, R. H., & Albano, J. E. (1980). Visual-motor function of the primate colliculus superior, *3*(1), 189–226.

Xu, F., & Spelke, E. (2002). Large number discrimination in 6-month-old infants: Evidence for the accumulator model. *Infant Behavior and Development*, *21*, 770. https://doi.org/10.1016/s0163-6383(98)91983-x

Xuan, B., Zhang, D., He, S., & Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, *7*(10), 2. https://doi.org/10.1167/7.10.2

Yon, D., Edey, R., Ivry, R. B., & Press, C. (2016). Time on your hands : Perceived duration of sensory events is biased towards concurrent actions. *Journal of Experimental Psychology. General*, (October).

Zimmermann, E., & Lappe, M. (2010). Motor signals in visual localization. *Journal of Vision*, *10*(6), 2–2.

Zimmermann, E., & Lappe, M. (2016). Visual Space Constructed by Saccade Motor Maps. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 225. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00225

Zollinger, M. (2004). Le jugement comparatif des prix par le consommateur. *Recherche et Applications En Marketing*, *19*(2), 73–97.

Zorzi, M., Bonato, M., Treccani, B., Scalambrin, G., Marenzi, R., & Priftis, K. (2012). Neglect Impairs Explicit Processing of the Mental Number Line. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 125. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00125