

# **Modèle d'évolutions des Priors selon le modèle LATER**

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du titre de  
Master of Science en sciences du sport  
Option enseignement

déposé par

**Patrick Kohler**

à

l'Université de Fribourg, Suisse  
Faculté des sciences et de médecine  
Section Médecine  
Département des neurosciences et sciences du mouvement

en collaboration avec la  
Haute école fédérale de sport de Macolin

Référent  
Prof. Jean-Pierre Bresciani

Conseiller  
Assistant-docteur Julien Audiffren

Fribourg, Juin 2022

## **Remerciements**

Mes premiers remerciements s'adressent à mon conseiller, le Dr. Julien Audiffren, qui fut toujours présent pour aiguiller mes questionnements et m'introduire dans le monde de la recherche scientifique. Je remercie chaleureusement le Pr. Jean-Pierre Bresciani d'avoir pris le temps de me détailler les possibles travaux de master à choix et d'avoir suivi mon implication dans ce travail.

Je tiens particulièrement à remercier les participants, dont je ne peux citer les noms pour des raisons évidentes d'anonymat. Je suis sûr qu'ils sauront se reconnaître.

Un dernier remerciement et pas des moindres aux membres de ma « tribu » qui ont su m'apporter la « pitance » et le contexte social nécessaire à ma survie. Spéciale dédicace ou « Big Up Braaaa Babylone » à Florent Uber dont le rêve était d'apposer son nom sur un travail de master.

## Résumé

La vision est le principal sens qui permet l'interaction et l'adaptation à l'environnement (Panouillères, 2011) et la fovéation vers de nouvelles cibles est permise grâce aux saccades oculaires (Kandel et al., 2021). Les informations visuelles perçues par la rétine sont transmises au Colliculus Supérieur (CS) qui permet le déplacement du regard (Isa et al., 2021). En théorie, 60 ms sont nécessaires pour générer une saccade suite à un stimulus, alors qu'il faut 180 ms pour effectuer une saccade, car le CS ne peut pas déterminer ce que l'humain regarde (Noorani & Carpenter, 2016). Le temps de réaction saccadique ou temps de latence saccadique (TR) devrait être dominé par le temps de décision et ses caractéristiques devraient refléter un mécanisme décisionnel idéal (Carpenter, 2012). Une théorie stipule que pour être rationnelles, les décisions seraient probabilistes et leurs processus devraient être bayésiens (Good, 1952). Pour comprendre le processus décisionnel humain, *Carpenter (1981)* a proposé le modèle LATER (Linear Approach to Threshold with Ergotic Rate). Le modèle LATER postule que le TR est le temps nécessaire pour qu'un signal  $S$ , activé par un stimulus, croisse linéairement depuis sa valeur initiale  $S_0$  jusqu'à sa valeur de seuil  $ST$  auquel une réponse est initiée. Si le taux de croissance de  $S$  est  $r$  et la différence entre la valeur initiale et la valeur de seuil est  $\Theta$  ( $\Theta = ST - S_0$ ), alors le TR sera donné par  $T = \Theta/r$ . Le TR suivrait une loi récinormale et le comportement d'un sujet pourrait être représenté par deux paramètres  $r(\mu; \sigma^2)$  (Noorani & Carpenter, 2016). Ce travail étudie l'évolution du TR à travers la reproduction d'une partie de l'expérience de *Carpenter (1996)*. Il cherchera à retrouver la récinormalité du TR, déterminer si la probabilité d'apparition des cibles affecte la valeur  $S_0$  et vérifier la corrélation inverse entre la probabilité d'apparition d'une cible et le TR. Pour ce faire, 25 jeunes participants sans problème neurologique ont effectué 8 blocs de 150 saccades avec la tête fixe, pour lesquelles la probabilité d'apparition gauche/droite des stimuli était répartie en trois conditions (50-50 ; 33-66 ; 20-80 %). Les données obtenues n'ont pas permis de reproduire les résultats *Carpenter (1995)*. Aucune condition ne permet de conclure à une récinormalité des TR et la modification des priors n'affecte pas significativement la valeur du seuil initial  $S_0$ .

Selon mes résultats, le TR ne semble pas suivre une loi récinormale comme suggéré dans la littérature scientifique (Carpenter & Williams, 1995). Je n'ai pas observé d'évolution de la valeur de  $S_0$  selon les priors et par conséquent, je n'ai pas retrouvé les résultats de *Carpenter (1995)* concernant la corrélation inverse du TR et des priors.

## Table des matières

1 Introduction .....	5
1.1 Décision et attention .....	5
1.2 Voie rétino-tectale .....	7
1.3 Voie tecto-rétinale .....	16
1.4 Le modèle LATER .....	22
1.5 Objectif du travail .....	31
2 Méthode.....	32
2.1 Échantillon.....	32
2.2 Matériel expérimental.....	32
2.3 Procédure expérimentale .....	33
2.4 Analyse statistique des données .....	36
3 Résultats .....	37
4 Discussion .....	42
4.1 Est-ce que les échantillons de l'œil gauche et de l'œil droit dans la condition à 50 % appartiennent-ils à la même population ? .....	42
4.2 Le pourcentage d'erreur.....	42
4.3 Le pourcentage de saccades précoces et tardives .....	43
4.4 H1 : La réciprobité du temps de latence .....	44
4.5 H2 : Corrélation entre TR et priors.....	46
5 Conclusion.....	47
Bibliographie .....	48
Annexe .....	53

# 1 Introduction

## 1.1 Décision et attention

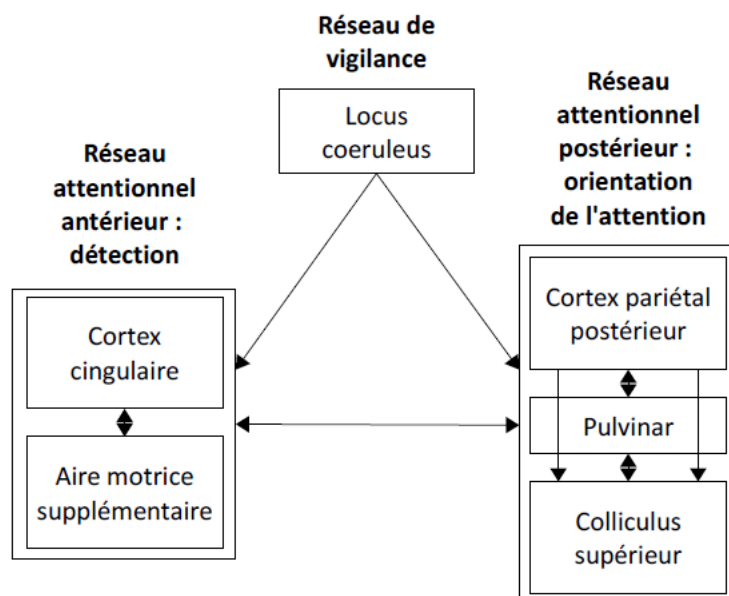
L'objectif principal de la prise de décision est d'atteindre un résultat désiré tout en évitant son opposé (Gold & Shadlen, 2007). Selon la théorie du choix basé sur la valeur (*Value-based theories of choice*) utilisée en neuroscience, en psychologie et en économie, les humains sont capables d'attribuer une valeur à une option décisionnelle afin de pouvoir les comparer (Vlaev et al., 2011). Les décisions découlant de notre mode de pensée peuvent être classifiées dans la catégorie intuitive (*système I*) ou analytique (*système II*) (Papaioannou et al., 2021). Le système I, attribué à un processus autonome, est rapide, automatique et sans effort. Le système II, attribué à un mécanisme cognitif de haut niveau est lent, contemplatif et exigeant (Evans & Stanovich, 2013; Kahneman, 2011). Dépendant de l'attention allouée à la pertinence d'un stimulus, le système I permet d'automatiser la fonction de perception du monde environnant (Kahneman, 2011). Afin décider de l'endroit où l'individu doit poser son regard, il doit faire preuve d'attention afin de percevoir les options qui s'offrent à lui avant de pouvoir les traiter. Ces deux actions ainsi que la transmission de commande à l'appareil moteur, constituent les bases physiologiques du comportement des mammifères (Campbell et al., 2012). Selon *James William*, l'attention est la prise de possession par l'esprit d'un objet, impliquant l'ignorance d'autres objets afin de traiter l'objet de focalisation plus efficacement (Team, 2017). L'attention constitue un mécanisme sélectif qui met en correspondance différentes aires corticales selon le but accordé à celle-ci (Silva, 2010) et dont les connections sont réciproques. C'est-à-dire que chaque aire recevant des informations répond par un feedback et ce dans une constante communication (Kandel et al., 2021). Le terme d'*attention spatiale* est utilisé lorsque les processus attentionnels se concentrent sur les caractéristiques spatiales d'un objet. *L'attention sélective visuo-spatiale*, pour sa part, mobilise les ressources attentionnelles sur une partie précise du champ visuel afin d'optimiser la détection d'objet dans cette région précise tout en réduisant l'importance des autres informations extérieures (Lithfous et al., 2018). Le processus attentionnel est nécessaire à notre perception visuelle, car il permet de se représenter notre environnement de manière cohérente (Rensink, 2000) et d'en détecter les changements (Rensink et al., 1997). La majorité des informations du monde extérieur perçue par notre cerveau proviennent du sens visuel (Silva, 2010), car c'est, principalement, notre vision qui permet l'interaction et l'adaptation à notre environnement (Panouillères, 2011). *L'attention explicite* représente l'association du processus attentionnel et celui du déplacement du regard vers le stimulus détecté. C'est ce que Posner détermine comme une *attention ouverte* (Posner & Rothbart, 2007). *L'orientation endogène* de notre

attention permet de diriger volontairement notre regard, et ce, grâce à des processus cognitifs contrôlés ou descendants (*top-down*) conduits et contrôlés par les attentes de l'individu (Lithfous et al., 2018).

Selon le modèle du triple réseau attentionnel de Posner de la (cf. Figure 1) (Posner & Petersen, 1990), il y aurait trois modules indépendants du reste du système cognitif. Le modèle comprend un réseau de maintien de la vigilance comprenant le locus coeruleus et ses connexions vers les cortex pariétal et cingulaire ainsi que deux réseaux attentionnels. Le premier, dit antérieur, permettant la détection d'objet et la sélection de réponse appropriée est composé par le cortex cingulaire et l'aire motrice supplémentaire. Le second, dit postérieur, permettant l'orientation de l'attention est composé du cortex pariétal supérieur, le pulvinar et le colliculus supérieur (CS). Chaque zone possède son propre rôle qui est respectivement, le désengagement, l'engagement et la modification de la localisation de l'attention (Silva, 2010). L'attention visuelle est un mécanisme pré-attentif rapide se basant sur des attributs visuels basiques. Par conséquent, c'est le système visuel primaire qui permet de déterminer la singularité des stimuli comme par exemple, une couleur, un contraste et une apparition (Silva, 2010).

**Figure 1**

*Représentation du modèle du triple réseau attentionnel de Posner*



*Note.* Illustration du modèle de Posner représentant les trois réseaux associés à la vigilance et à l'attention ainsi que leurs localisations et interactions (flèches) (Posner & Petersen, 1990).

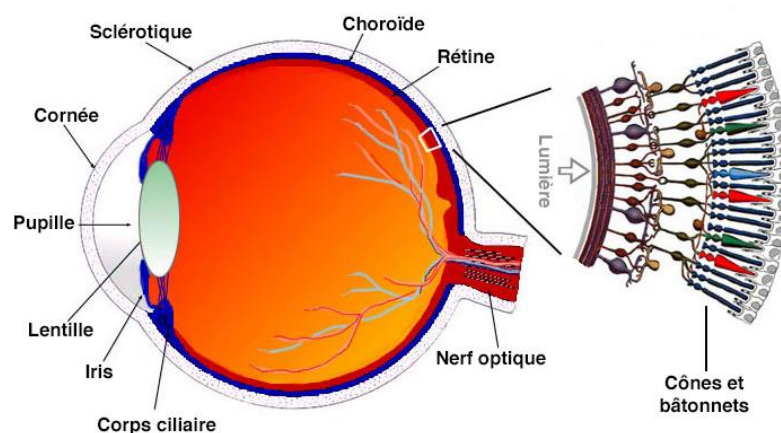
## 1.2 Voie rétino-tectale

Le système visuel perçoit environ 80 % de toutes les informations de l'environnement qui sont interprétés comme des stimuli par le *processus sensoriel*. Un stimulus correspond à une forme d'énergie activatrice de récepteurs sensoriels qui peut être d'un minimum énergétique égal à un seul photon (Campbell et al., 2012). L'œil est l'organe sensoriel collecteur d'informations visuelles dont la partie interne, la rétine, correspond à la structure sensorielle. C'est à l'intérieur de cette dernière que sont situées les cellules spécialisées sensibles à la lumière (Panouillères, 2011).

La lumière pénètre le corps humain à travers une première lentille convergente, légèrement saillante située sur la partie antérieure de l'œil, la cornée. De par sa forme de calotte asphérique et par sa transparence, elle réfracte la lumière à travers l'iris, une membrane circulaire et contractile, sur la seconde lentille convergente, le cristallin. Alors que la contraction ou la dilatation de l'iris détermine le flux d'énergie lumineuse atteignant le cristallin, c'est cette dernière lentille biconvexe qui permet l'accommodation visuelle et donc de former une image nette sur la rétine (cf. Figure 2) (Campbell et al., 2012). La rétine est une fine membrane composée de trois couches cellulaires séparées par 2 couches synaptiques (Kandel et al., 2021) dont le rôle est de transformer l'énergie lumineuse en influx nerveux interprétable par le cerveau (Campbell et al., 2012).

**Figure 2**

*Schéma des différentes structures anatomiques de l'œil*



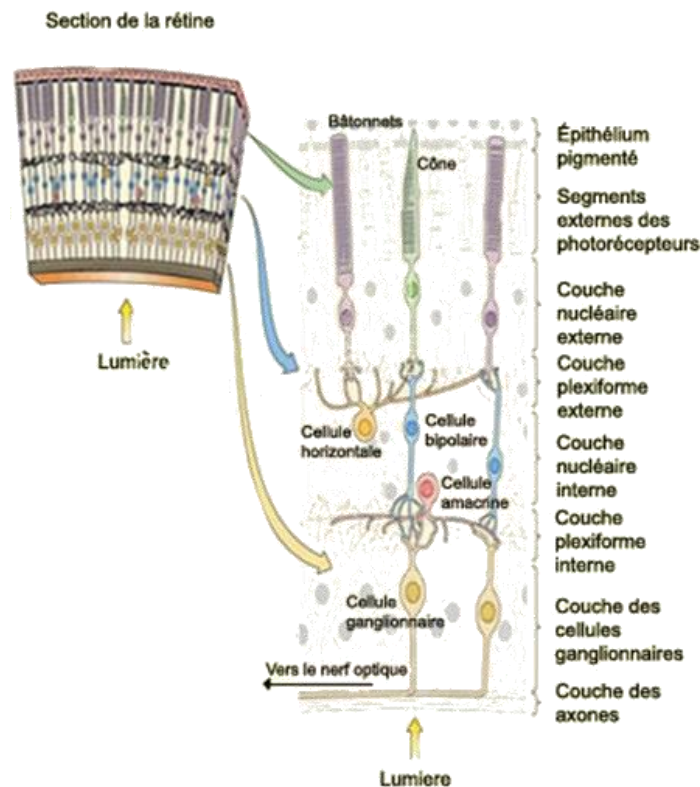
*Note.* (L'œil – Blue Cone Monochromacy, s. d.).

### 1.2.1 Première couche : les photorécepteurs

Le photon, traverse la rétine composée de cellules transparentes pour percuter l'une des deux cellules photosensibles (bâtonnet ou cône) formant la première couche cellulaire (Campbell et al., 2012). Le cas échéant, il termine son parcours absorbé par l'épithélium pigmentaire rétinien afin qu'il ne se diffuse pas dans l'œil (cf. Figure 3).

**Figure 3**

*Schéma de cellules composant la rétine*



*Note.* (LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!, s. d.).

Les photorécepteurs se ressemblent par leur structure commune composée de quatre régions fonctionnelles différentes : le segment externe, situé à la surface distale de la rétine neurale ; le segment interne, plus proximal ; le corps cellulaire ; et le terminal synaptique. (Kandel et al., 2021). Cependant, ils diffèrent par leurs morphologies, fonctions et répartitions (Panouillères, 2011). Pour la forme, un bâtonnet possède un segment externe long et cylindrique à l'intérieur duquel des disques sont séparés de la membrane plasmique. Contrairement au cône qui possède un segment externe plus court et effilé, ainsi que des disques qui continuent la membrane externe. Le bâtonnet est particulièrement sensible à la lumière et permet une vision achromatique



et scotopique (Campbell et al., 2012). Les cônes, de trois types différents, permettent une vision photopique trichromatique et une bonne acuité visuelle (Panouillères, 2011). Ces derniers, nommés cynolabes, chlorolabes et érythrolabes se distinguent par leur opsine spécifique, qui est sensible à une longueur d'onde particulière. Ils détectent respectivement le bleu (420 nm) grâce à l'iodopsine S, le vert (530 nm) grâce à l'iodopsine M et le rouge (560 nm) grâce à l'iodopsine L (Deeb, 2005). Environ 100 millions de bâtonnets sont présents dans toute la rétine à l'exception d'une petite zone centrale d'environ 0,5 mm de diamètre nommée la fovéa. Zone où environ 5 millions de cônes y sont concentrés, permettant par conséquent une acuité visuelle élevée, alors que leur densité chute à fur et à mesure de son éloignement (Panouillères, 2011). Les deux photorécepteurs convertissent la lumière en un signal neuronal de manière très similaire grâce au processus de phototransduction (Kandel et al., 2021).

### ***1.2.2 la phototransduction dans le bâtonnet***

Dans les disques de la partie extérieure, se trouve une chromoprotéine pigmentaire photosensible qui est la rhodopsine chez les bâtonnets et la iodopsine chez les cônes. Elles sont toutes deux composées d'une protéine transmembranaire de type opsine et d'un rétinol, un groupement prosthétique de l'une des trois formes de la vitamine A. Seul l'isomère de conformation 11-cis du rétinol peut absorber l'énergie d'un photon, ce qui va produire une rotation d'une partie de ces atomes et modifier sa configuration en isomère de conformation all-trans. Le processus de phototransduction étant similaire pour les deux photorécepteurs, l'explication se portera sur le bâtonnet (cf. Figure 4).

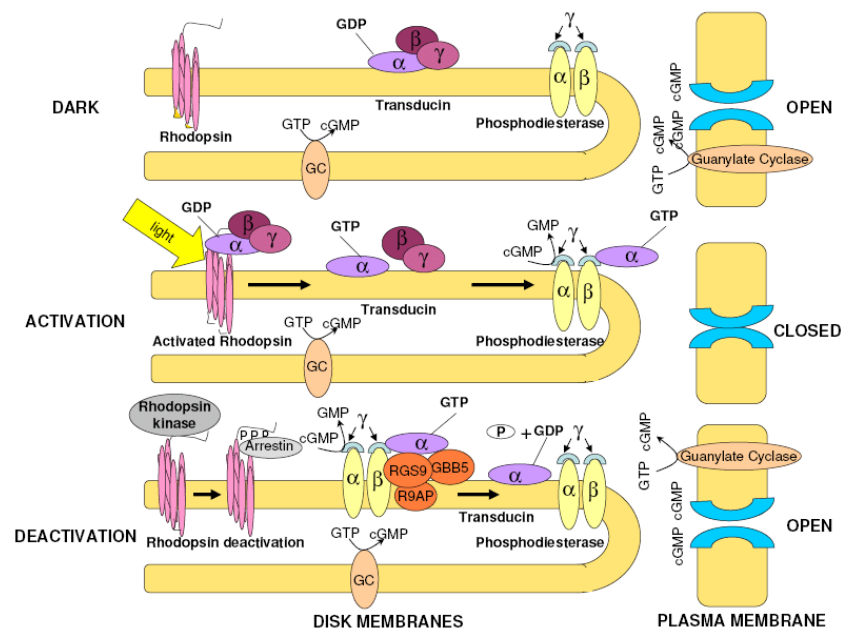
Le changement de forme de la molécule rétinienne entraîne un changement de conformation de l'opsine qui passe à un état activé appelé métarhodopsine II. La métarhodopsine II étant instable va se diviser et libérer l'all-trans rétinien. L'opsine désormais accessible va activer la transducine, un membre de la famille des protéines G qui lorsqu'elle est inactivée est liée avec une molécule de guanosine diphosphate. Une fois activée cette molécule favorise la modification de la guanosine diphosphate en guanosine triphosphate (GTP) ce qui mène à la transformation de ses sous-unités en, entre autres,  $T\alpha$ -GTP, une  $\alpha$ -sous-unités de transport de la GTP. La sous-unité  $T\alpha$ -GTP peut ainsi former un complexe avec une enzyme, la phosphodiesterase de nucléotide cyclique, ce qui augmente considérablement la vitesse d'hydrolyse des molécules de la guanosine monophosphate cyclique (GMPc) en 5'GMP. Afin d'amplifier la réponse cellulaire, la métarhodopsine II peut activer des centaines de molécules de transducine supplémentaire et chaque molécule de phosphodiesterase peut hydrolyser plus de 1 000 molécules de GMPc par seconde.

Dans le segment interne, le niveau de dépolarisation du photorécepteur est maintenu à -40 mV par des canaux calciques et par le flux de cations de sodium entrant à travers les canaux ioniques maintenus ouvert par leur liaison avec les molécules GMPc. Lorsque le taux de GMPc chute, la tension de la cellule devient moins positive ce qui cause une hyperpolarisation du photorécepteur, qui va engendrer un potentiel postsynaptique inhibiteur (PPSI) le long de l'axone jusqu'au terminal du synapse.

Puisque l'ouverture des canaux calciques synaptiques dépend du voltage, lorsque ce voltage diminue, les cations calciques entrants sont moins nombreux. Ce qui a pour conséquence de relâcher une plus petite quantité du neurotransmetteur glutamate sur les deux types de neurones postsynaptiques qui sont cellules bipolaire et les cellules horizontales (Kandel et al., 2021).

#### Figure 4

*Illustration de la phototransduction dans un bâtonnet*



*Note.* Cette illustration représente les différentes étapes de la phototransduction au sein d'un bâtonnet. En commençant par l'étape de l'obscurité (dark), puis à l'activation par la lumière pour terminer par la désactivation. GDP correspond à l'abréviation anglaise de guanosine diphosphate. GTP correspond à l'abréviation anglaise de guanosine triphosphate. cGMP correspond à l'abréviation anglaise de cyclic guanosine monophosphate. GC correspond à l'abréviation anglaise de guanosate cyclase (Leary et al., 2010).

### ***1.2.3 Première couche synaptique : les cellules horizontales***

Les cellules horizontales ont des dendrites à large arborisation qui s'étendent latéralement dans la couche plexiforme externe. Elles sont électriquement couplées les unes aux autres par des jonctions communicantes (jonctions gap) et avec les photorécepteurs au niveau des terminaux glutamatergiques partagés avec les cellules bipolaires. Les cellules horizontales contribuent à l'inhibition latérale du signal en mesurant le niveau moyen d'excitation de la population de photorécepteurs sur une large région (Tanaka & Tachibana, 2013). En absence de lumière, le haut taux de glutamate libéré par les photorécepteurs dépolarise les cellules horizontales. Inversement, lorsque le photorécepteur excité par la lumière libère moins de glutamate, la cellule horizontale s'hyperpolarise ce qui a pour conséquence une dépolarisation des photorécepteurs voisins. Ce signal, provoqué par l'excitation des photorécepteurs, est renvoyé au terminal du photorécepteur par une synapse inhibitrice. Ainsi, le terminal du photorécepteur est soumis à deux influences opposées : la lumière qui tombe sur le récepteur l'hyperpolarise, mais la lumière qui tombe sur la région environnante le dépolarise par l'intermédiaire des cellules horizontales. Le rôle des cellules horizontales est d'assurer que seuls les signaux des photorécepteurs bien illuminés soit transmis, ce qui permet d'améliorer le contraste et la définition du stimulus visuel. Ce sont les neurotransmetteurs GABA qui permettent cette rétroaction inhibitrice modulant ainsi l'activité des photorécepteurs et par extension celle des cellules bipolaires (Kandel et al., 2021).

### ***1.2.4 Deuxième couche : les cellules bipolaires***

Plusieurs photorécepteurs transmettent l'information à une même cellule bipolaire. Les deux variétés principales de cellules bipolaires répondant au niveau des synapses au glutamate sont les cellules ON et OFF, rendant le parcours désormais parallèle. D'un côté les cellules OFF, dont les récepteurs ionotropiques glutamiques sont de type AMPA-kainate, à recevoir moins de glutamate, vont moins se dépolariser. Si les cellules OFF sont moins dépolarisées, elles vont fournir un PPSI ce qui ne va pas stimuler la cellule ganglionnaire OFF à laquelle elles sont connectées par des synapses inhibitrices. De l'autre côté, les cellules ON, dont les récepteurs métabotropiques sont liés à une protéine G, à recevoir moins de glutamate, vont se dépolariser. La dépolarisation des cellules ON va transmettre un potentiel postsynaptique excitateur (PPSE) qui va se traduire par une stimulation de la cellule ganglionnaire ON et des cellules amacrines, auxquelles elles sont connectées. Le transfert de l'information visuelle à travers les cellules bipolaires dépend de l'inhibition des cellules inhibitrices de type OFF et de l'arrêt de l'inhibition des cellules excitatrices de type ON (Kandel et al., 2021).

### ***1.2.5 Deuxième couche synaptique : les cellules amacrines***

Malgré leurs nombreux sous-types (au moins 33), les cellules amacrines contribuent plus ou moins au même rôle d'inhibition latérale que les cellules horizontales. Les cellules amacrines sont des neurones dont les processus se ramifient uniquement dans la couche plexiforme interne de la rétine. Les cellules amacrines reçoivent généralement des signaux excitateurs des cellules bipolaires au niveau des synapses glutamatergiques. Elles renvoient l'information, soit directement à la cellule bipolaire présynaptique par le biais de synapses inhibitrices réciproques soit à d'autres cellules amacrines avec lesquelles elles sont électriquement couplées soit directement aux cellules ganglionnaires (Kandel et al., 2021).

### ***1.2.6 Troisième couche : les cellules ganglionnaires***

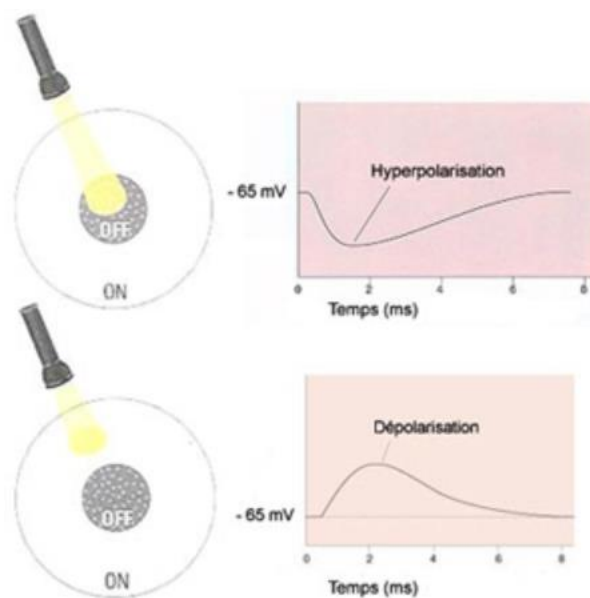
Plusieurs cellules bipolaires transmettent l'information à une même cellule ganglionnaire (Kandel et al., 2021), tout en préservant le parallélisme ON et OFF. Chacun des deux types de cellules ganglionnaires désigne un champ récepteur ON et OFF. Ce dernier, de taille variable, représente la partie du champ visuel composé de l'ensemble des bâtonnets et cônes connecté à une cellule ganglionnaire. La taille de ce champ, détermine l'acuité visuelle. Plus il est petit, comme dans la fovéa de la macula et plus l'image transmise sera nette. Plus la distance du centre est grande et plus les champs de récepteur sont larges et, contrairement à l'acuité visuelle, plus la sensibilité à la lumière est grande (Campbell et al., 2012). Expliqués dans la thèse de Pignat (2005), les champs récepteurs sont constitués d'une partie centrale et d'une partie périphérique qui peuvent être séparés par deux classes chacun : les champs récepteurs à centre OFF et les champs récepteurs à centre ON (cf. Figure 5). Ces deux classes ont un fonctionnement exactement opposé. Lorsque de la lumière stimule la partie centrale d'un champ récepteur à champs OFF, la cellule s'hyperpolarise ce qui inhibe la transmission du signal. Cependant, lorsque la partie périphérique de ce champ est stimulée, le champ se dépolarise et permet la transmission de l'information provenant du signal lumineux (Pignat, 2005).

Ce sont des neurotransmetteurs glutamiques qui excitent les cellules ganglionnaires. Lorsque ces neurones ont atteint un seuil de dépolarisation suffisant, ils déclenchent un potentiel d'action qui sera transmis le long de leurs axones qui eux constituent le nerf optique (Kaplan, 2003). C'est dans l'orbite du globe oculaire que naît le nerf optique pour se terminer dans l'angle antérolatéral de la cavité crânienne, appelé chiasma optique. Le nerf optique ne compte qu'environ 1 % d'axones par rapport au nombre de cellules réceptrices. C'est pourquoi le traitement visuel de bas niveau s'effectue dans la rétine avant d'être projeté, à part le disque optique, dans

le cerveau à travers environ 1 million de fibres nerveuses qui composent le nerf crânien II (Kandel et al., 2021).

### Figure 5

*Illustration de la polarisation des champs récepteurs à centre ON et OFF*



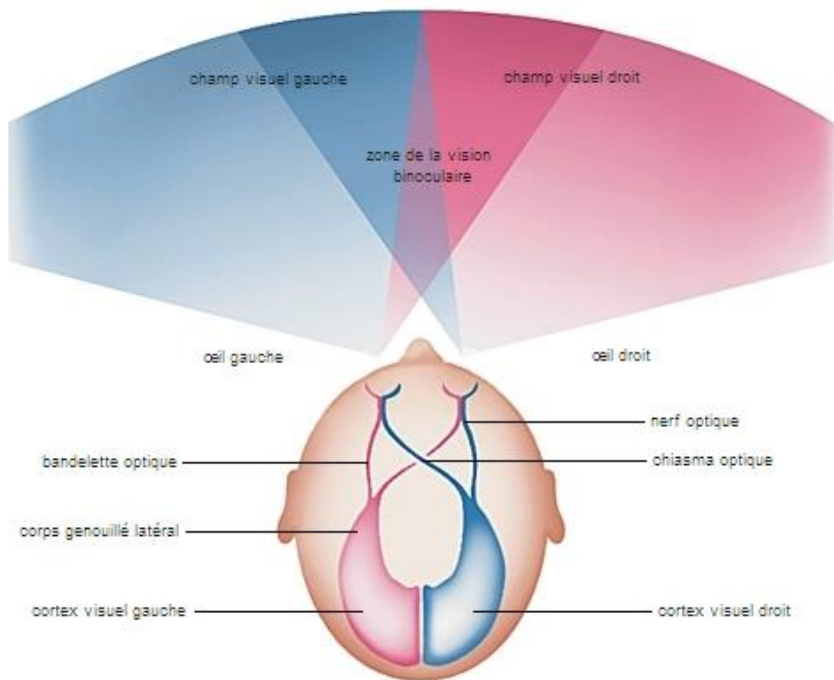
*Note.* (LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!, s. d.).

#### **1.2.7 Champ visuel, chiasme, hémirétine**

Le champ visuel est décrit (cf. Figure 6) comme la zone complète dans laquelle des objets peuvent être aperçus dans la vision périphérique pendant que le regard fixe un point central (*Visual Field*, s. d.). Ce champ est partagé par les deux yeux et chaque œil possède deux hémirétines, l'une nasale interne et l'autre temporale externe, dont le tractus optique est respectivement contralatéral et ipsilatéral. Parce que chaque hémirétine temporale d'un œil perçoit le même demi-champ visuel que l'hémirétine nasale de l'autre œil, une décussation des fibres est nécessaire. Elle se déroule au niveau du chiasma optique et garantit que chaque demi-champ visuel perçu par l'hémirétine nasale est traité dans l'hémisphère cérébral contralatéral. Au-delà du chiasma, les fibres de chaque hémirétine temporale se dirigent vers l'hémisphère ipsilatéral le long du tractus optique ipsilatéral. Les axones des hémirétines nasale et temporale transportant les informations d'un hémichamp se rejoignent dans le tractus optique, qui s'étend jusqu'au noyau géniculé latéral (LGN) du thalamus (Kandel et al., 2021).

**Figure 6**

*Illustration du champ visuel humain*



*Note.* (Larousse, s. d.).

### ***1.2.8 Les voies visuelles primaires***

La première voie visuelle primaire est appelée voie géniculostriée, car elle passe par le LGN avant d'atteindre le cortex visuel primaire. Le LGN est une petite structure ovoïde dans le thalamus qui, chez les humains, est constitué de six couches primaires : deux magnocellulaires (1 et 2) et quatre parvocellulaires (3-6). Les canaux parallèles établis dans les rétines restent anatomiquement séparés par le LGN. Chaque couche géniculée reçoit des informations de l'œil ipsilatéral ou de l'œil controlatéral, mais elles sont alignées de manière à provenir d'une région correspondante de l'hémichamp controlatéral. Ils forment ainsi un ensemble de cartes de correspondance empilées les unes sur les autres. Les couches parvocellulaires reçoivent les informations sur le contraste rouge-vert des cellules ganglionnaires naines de la rétine, qui sont les plus nombreuses (~70 %). Les couches magnocellulaires reçoivent des informations du contraste achromatique des cellules ganglionnaires du parasol (~10 %). Les couches Koniocellulaires reçoivent les informations du contraste bleu-jaune des petites et grandes cellules ganglionnaires bistratifiées (~8 %) ainsi que d'autres classes de cellules ganglionnaires rétinienne. Le LGN n'est pas qu'un simple relais ; les informations rétinienne qu'il reçoit peuvent être fortement modulées par l'attention et l'éveil grâce à des connexions inhibitrices avec cette région

du cerveau et à la rétroaction du cortex visuel. La deuxième voie s'étend de la rétine à la zone prétéctale du mésencéphale, où les neurones assurent la médiation des réflexes pupillaires qui contrôlent la quantité de lumière qui pénètre dans les yeux. La troisième voie partant de la rétine mène au CS pour continuer vers la formation pontine dans le tronc cérébral, puis vers les noyaux moteurs extra-oculaires. Cette voie joue un rôle important dans le contrôle des mouvements oculaires (Kandel et al., 2021).

### ***1.2.9 Fovéation***

La macula est une zone de la rétine, d'environ 5,5 mm de diamètre, située au fond de l'œil dans l'axe de la pupille, dépourvue de bâtonnets et possédant la plus forte densité de cône (~150'000 par millimètre carré). Permettant ainsi une vision détaillée en éclairage diurne ou acuité visuelle (Campbell et al., 2012). La taille et l'espacement des photorécepteurs deviennent de plus en plus grands, au fur et à mesure qu'ils sont éloignés de cette zone (Panouillères, 2011). En son centre, une dépression d'environ 1,5 centimètre, nommée la fovéa est la zone d'acuité visuelle maximale. Toutes images traitées par la fovéa sont nettes et précises et plus l'éloignement est grand et plus les images sont floues et imprécises (Akman, 2003). La partie la plus rostrale du CS reçoit des entrées de la fovéa et de la représentation de la fovéa dans le cortex visuel primaire (V1). Comme les neurones sont actifs pendant la fixation visuelle, cette zone du CS est souvent appelée zone de fixation. Les neurones de cette région inhibent les neurones liés au mouvement dans les parties plus caudales du colliculus et se projettent aussi directement dans le noyau du raphé dorsal, où ils inhibent la génération de saccades en excitant les neurones omnipauseurs. (Kandel et al., 2021). Lorsqu'un stimulus d'intérêt apparaît dans la périphérie du champ visuel, stimulant plus de batônnets que de cônes, il ne sera pas perçu précisément. C'est pourquoi, les mouvements oculaires sont indispensables à la perception de la complexité du monde environnant. Ils permettent la fovéation, un déplacement du point de fixation du regard amenant l'objet d'intérêt au centre de la fovéa (Akman, 2003). Le système saccadique permet de déplacer rapidement le regard, ou saccades, pour provoquer la fovéation de nouvelles cibles (Kandel et al., 2021). La saccade oculaire peut être décomposée en trois périodes. La première, pendant laquelle l'œil est immobile, s'appelle la période de préparation et dure environ 100 ms. La seconde, pendant laquelle l'œil tourne dans l'orbite sous l'action des muscles extra-oculaire, est la saccade proprement dite et dure entre 25 et 80 ms. La troisième est à nouveau une période de fixation alors que les muscles extra-oculaires se détendent et dure environ 200 ms. Ces trois périodes sont en partie contrôlée par le CS (Asadi Eydivand et al., 2012).

## 1.3 Voie tecto-rétinale

### 1.3.1 *Colliculus supérieur*

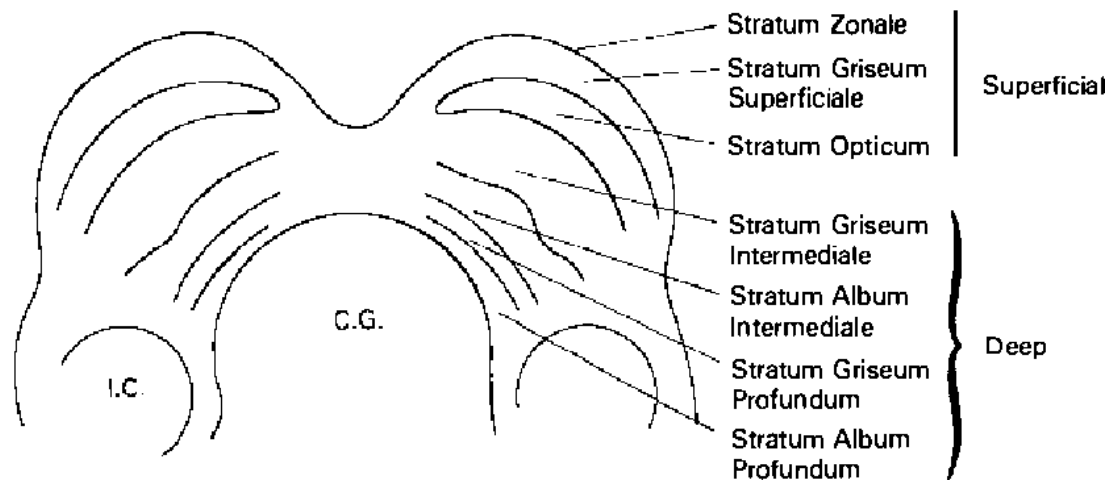
Le CS est une structure sous-corticale bilatérale située sur le toit du mésencéphale, situé sous le thalamus et entourant la glande pinéale. Il comprend la face dorsale du mésencéphale, postérieure au gris périaqueducal et immédiatement supérieure au colliculus inférieur. Il est composé de sept couches alternées de fibres et de cellules qui forment deux unités fonctionnelles. La superficielle, composée de 3 couches, a un rôle sensoriel et la profonde composée de 4 couches, a un rôle moteur. Les couches de la plus superficielle à la plus profonde sont (cf. Figure 7) : le stratum zonal, le stratum griseum superficiale, le stratum opticum, le stratum griseum intermediale, le stratum album intermediale, le stratum griseum profundum et le stratum album profundum. Les entrées des trois premières couches superficielles sont presque uniquement visuelles et elles reçoivent les informations transmises par la rétine sous la forme d'une carte rétinotopique. C'est-à-dire qu'il y a une préservation de la disposition spatiale des réponses neuronales à des stimuli visuels. Chaque neurone représente un champ récepteur qui est une zone du champ visuel qui va entraîner une réponse d'un neurone précis. Le champ moteur est défini par l'ensemble des directions oculaires vectorielles (défini par une amplitude et une direction) pour lesquels un même neurone va décharger. Par les couches profondes, le CS transmet les commandes motrices, à travers un champ moteur, aux muscles oculaires (Isa et al., 2021). Les neurones liés au mouvement forment une carte des mouvements oculaires potentiels qui correspond aux réseaux visuotopique et tonotopique des entrées sensorielles. Par conséquent, les neurones qui contrôlent les mouvements oculaires vers une cible particulière se trouvent dans la même région que les cellules excitées par l'image de cette cible (Kandel et al., 2021). Les champs moteurs, organisés topographiquement, ne dépendent pas de la position initiale de l'œil. Ce sont les neurones situés sur le méridien horizontal qui déchargeront un potentiel d'action pour activer les muscles extra-oculaires permettant le mouvement des yeux (Isa et al., 2021). Ce signal est transmis au noyau Abducens, noyau dont les axones forment le nerf abducens (nerf crânial VI), situé dans la jonction bulbo-pontique et oculomoteur, noyau dont les axones forment le nerf oculomoteur commun (nerf crânial III), situé à l'avant du mésencéphale. Ils permettent le mouvement horizontal en innervant respectivement les muscles antagonistes du droit externe, permettant l'abduction temporelle et du droit interne, permettant l'adduction nasale (Panouillères, 2011). Le CS est plus qu'un simple relais visuomoteur, car non seulement, il transforme directement les signaux sensoriels en réponses comportementales, mais il permet également l'extraction de caractéristiques critiques après un traitement intrinsèque des signaux visuels. Ce



sont les projections descendantes en direction de la formation réticulaire pontique paramédiane et de la moelle épinière qui permet une réponse aux stimuli plus rapide que le ce que le traitement cortical permettrait (Isa et al., 2021). Le CS est contrôlé par deux régions du cortex cérébral dont les fonctions se chevauchent, mais sont distinctes : l'aire intrapariétale latérale du cortex pariétal postérieur (partie de l'aire 7 de Brodmann) et le champ visuel frontal (partie de l'aire 8 de Brodmann). Chacune de ces zones contribue à la génération des saccades et au contrôle de l'attention visuelle, parce que les mouvements oculaires saccadés et l'attention visuelle sont étroitement liés (Kandel et al., 2021).

**Figure 7**

*Dessin d'une section coronale à travers le colliculus.*



*Note.* Les sept couches indiquées à droite sont divisées en trois couches désignées comme la division superficielle et quatre couches désignées comme la division profonde. I.C. correspond à l'abréviation anglaise de inferior colliculus. C.G. correspond à l'abréviation anglaise de central gray (Wurtz & Albano, 1980).

### ***1.3.2 Fixation du regard***

L'activité des couches superficielles et intermédiaires du CS peut se produire indépendamment : l'activité sensorielle dans les couches superficielles ne conduit pas toujours à une sortie motrice, et une sortie motrice peut se produire sans activité sensorielle dans les couches superficielles. En fait, les neurones des couches superficielles ne fournissent pas une grande projection directe vers les couches intermédiaires. Au lieu de cela, leurs axones se terminent sur les neurones des noyaux pulvinaires et latéraux postérieurs du thalamus, qui relaient les signaux des

couches superficielles du CS vers les régions corticales qui se projettent ensuite vers les couches intermédiaires (Kandel et al., 2021). Alors que les projections des couches plus profondes se projettent sur deux grandes voies descendantes en direction du tronc cérébral et de la moelle épinière, ainsi que de nombreuses projections ascendantes en direction de différents centres sensoriels et moteurs dont certains permettent la génération de saccades (Isa et al., 2021).

La partie la plus rostrale du CS contrôle la fixation du regard. Elle reçoit des entrées de la fovéa et de la représentation de la fovéa dans le cortex visuel primaire (V1) et ses neurones de fixation déchargent fortement pendant la fixation visuelle active. Les neurones de cette zone inhibent directement les neurones liés au mouvement dans les parties plus caudales du colliculus et se projettent dans le noyau du raphé dorsal, où ils excitent les neurones omnipauseurs (OPNs) ce qui inhibe également le mouvement oculaire (Panouillères, 2011).

### ***1.3.3 Saccades oculaires***

Les neurones des couches plus profondes présentent des valves présaccadiques, une activité de haute fréquence précédant le début des saccades vers une localisation précise. C'est sur cette carte de mouvements oculaires potentiels que va être déterminé l'amplitude et la direction de la saccade, codées comme un vecteur par des neurones possédant un champ moteur (Isa et al., 2021). L'activité va ensuite être transmise au générateur saccadique, localisé dans la formation réticulée du tronc cérébral, responsable de la production de saccades horizontales de type *pulse-step*. L'activité de type pulse est le signal phasique qui lutte contre la viscosité s'exerçant sur l'œil pour induire le mouvement des yeux. Pour ce faire, il doit activer les muscles oculaires agonistes tout en inhibant les antagonistes. Trois sortes de neurones pré-moteurs sont responsables de la décharge de type *pulse* des motoneurones oculomoteurs (cf. Figure 8) :

- 1) Les neurones long-lead burst (LLBNs) : Répartis dans différentes régions de la formation réticulée du tronc cérébrales, ils sont les premiers à décharger, environ entre 40 et 100 ms avant le début de la saccade et leur pic d'activité est atteint au moment de la saccade. Leur premier rôle serait de transmettre l'amplitude aux neurones sort-lead burst ainsi qu'au cervelet et le second serait d'arrêter l'activité des OPNs.
- 2) Les neurones sort-lead burst (SLBNs) : Inactifs pendant la période de fixation, ils déchargent environ 10 à 12 ms avant la saccade ipsiversive et cessent de décharger environ 10 ms avant la fin de la saccade. La durée de la saccade est définie par la durée de leurs décharges et la quantité de potentiel d'action transmis est proportionnel à l'amplitude de la saccade. Deux types de SLBNs existent:

- A. Les neurones *exitatory burst* (EBNs) : Situés au niveau de la formation réticulée pontique paramédiane (PPRF), ils sont responsables de la décharge de type pulse des motoneurones ipsilatéraux. Par leurs synapses, ils excitent les motoneurones du noyau abducens ipsilatéral et les neurones toniques.
- B. Les neurones *inhibitory burst* (IBNs) : Situés au niveau de la formation réticulée bulbaire, ils sont responsables, lors d'une saccade ipsiversive, de mettre en pause la décharge des motoneurones contralatéraux. Par leurs synapses, ils inhibent les motoneurones du noyau abducens contralatéral ainsi que les EBNs et IBNs contralatéraux.

Alors que les SLBNs seraient excités par les afférences des LLBNs, ils sont inhibés par les OPNs et par les IBNs contralatéraux (Panouillères, 2011).

- 3) Les neurones omnipauseurs (OPNs) : Situés dans le noyau interstitiel du raphé, ils ont une activité tonique pendant les périodes de fixation ce qui inhibe les SLBNs. Leur inhibition serait déclenchée par le CS via les LLBNs avant le début de la saccade et se termine avant sa fin.

L'activité de type step est le signal tonique, déclenché par les neurones toniques qui maintiennent les yeux dans leur nouvelle localisation à la fin de chaque mouvement. Situés au niveau du noyau prepositus hypoglossi et du noyau vestibulaire médian, leur décharge excitatrice tonique est proportionnelle à la position horizontale des yeux.

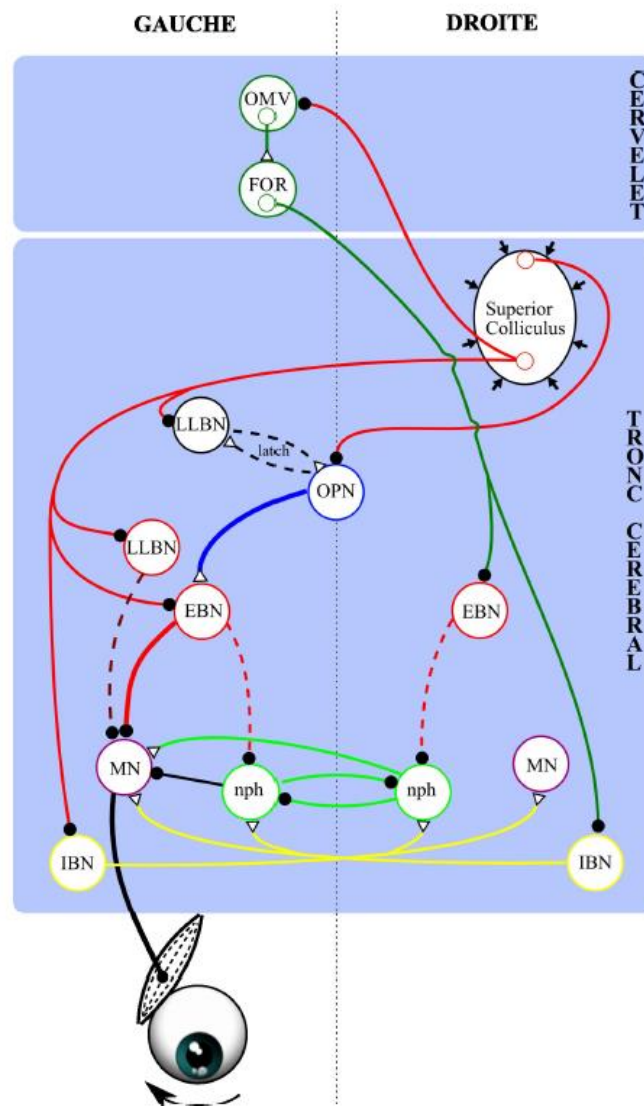
#### **1.3.4 TR et temps de conduction**

Puisque l'acuité visuelle est fortement dégradée lors de la saccade oculaire (Akman, 2003), cette dernière est nécessairement la plus rapide possible (vitesse maximale de 900° par seconde), afin que l'aveuglement soit le plus minime. Le TR menant à ce prompt mouvement est étonnement long et est très variable d'un essai à l'autre (Reddi & Carpenter, 2000). Chez le singe, le CS nécessite environ 40 ms pour détecter l'apparition du stimulus et il lui faut environ 20 ms pour provoquer un mouvement oculaire. En théorie, 60 ms sont nécessaires pour générer une saccade, cependant, en pratique, la latence saccadique moyenne est au moins trois fois plus longue (Noorani & Carpenter, 2016). Cette latence du TR ne peut pas être expliquée par le délai de conduction (Reddi & Carpenter, 2000). Les limites du colliculus qui traduisent un stimulus localisé en une réponse localisée permettent de la comprendre. Ses cellules visuelles localisent les objets visuels, déterminant où ils se trouvent, mais elles sont incapables d'en discriminer les formes ou les couleurs et par conséquent leur pertinence. Le CS ne peut donc pas être autorisé à déterminer ce que l'humain regarde ; cela nécessite des processus d'évaluation beaucoup plus

complexes (Noorani & Carpenter, 2016). Comme ce type de traitement prend plus de temps que la simple cartographie du colliculus, des niveaux corticaux plus élevés doivent supprimer toniquement le colliculus, l'empêchant de faire des réponses simples, pendant que ces jugements plus sophistiqués sont faits (Noorani & Carpenter, 2016). Ce contrôle provient d'une partie des ganglions de la base appelée reticulata, qui est à son tour contrôlée par diverses zones de la substantia nigra pars du cortex cérébral (Carpenter, 1999). La latence est, en d'autres termes, le résultat d'une procrastination volontaire afin que la réponse ultérieure soit la plus adaptée possible à la situation perçue (Carpenter, 1981). La reconnaissance du fait que le temps de décision et le TR sont intimement liés sous-tend la conception du modèle LATER (Noorani & Carpenter, 2016).

**Figure 8**

*Schéma des connexions anatomiques des neurones du colliculus supérieur, du générateur saccadique et du cervelet oculomoteur pour des saccades horizontales vers la gauche*



*Note.* Les connexions excitatrices (cercles noirs) et les connexions inhibitrices (triangles blancs). Les flèches convergeant sur le Superior Colliculus (colliculus supérieur) représentent le rôle intégrateur de ce système. Les traits en pointillés représentent les projections hypothétiques. Abréviations : EBN : Les neurones excitatory burst – IBN : Les neurones inhibitory burst – latch : circuit inhibiteur réciproque prévenant la décharge des neurones omnipauseurs pendant les saccades – LLBN : Les neurones long-lead burst – MN : Les neurones moteurs – nph : nucleus prepositus hypoglossi – FOR : région Fastigial Oculomotrice – OMV : Vermis Oculomoteur (Panouillères, 2011).

## 1.4 Le modèle LATER

### 1.4.1 L'origine du modèle

Si le TR est dominé par le temps de décision (plutôt que d'être dû à des phénomènes de bas niveau tels que le retard synaptique ou la vitesse de conduction), ses caractéristiques devraient refléter un mécanisme décisionnel idéal (Carpenter, 2012). Une théorie stipule que pour être rationnelles, les décisions seraient probabilistes et leurs processus devraient être bayésiens (Good, 1952). Cependant, selon *Carpenter (1995 ; 200 ; 2012)* une caractéristique des histogrammes de latence est qu'ils ne correspondraient à aucune des fonctions mathématiques stochastiques standard, car ils sont asymétriques, avec une queue étirée de latences plus longues (Carpenter, 2012). Selon *Carpenter (1995 ; 200 ; 2012 ; 2016)* ce serait une constatation universelle, valable quel que soit le stimulus (visuel, auditif ou même tactile), la réponse (manuelle ou oculomotrice) ou l'espèce (chat, singe, humain) (Noorani & Carpenter, 2016).

C'est l'impossibilité de faire correspondre la distribution des temps de latence saccadiques à une fonctions stochastique standard qui, en 1981, a déclenché la conception du modèle LATER, pour Linear Approach to Threshold with Ergodic Rate qui signifie *approche linéaire du seuil avec taux ergodique*. Depuis, il est resté populaire en raison de sa simplicité (le modèle de base n'a que deux paramètres libres) et de la facilité avec laquelle il peut être utilisé pour modéliser le comportement. Particulièrement utilisé dans le domaine clinique, où LATER peut fournir des mesures quantitatives de la progression pathologique (dans la maladie de Parkinson-Huntington, la sclérose latérale amyotrophique, la démence, la paralysie supranucléaire progressive, l'endartériectomie, les lésions cérébrales traumatiques, la schizophrénie, l'encéphalopathie hépatique et la migraine) avec un degré de facilité rare en neurologie (Carpenter, 2012).

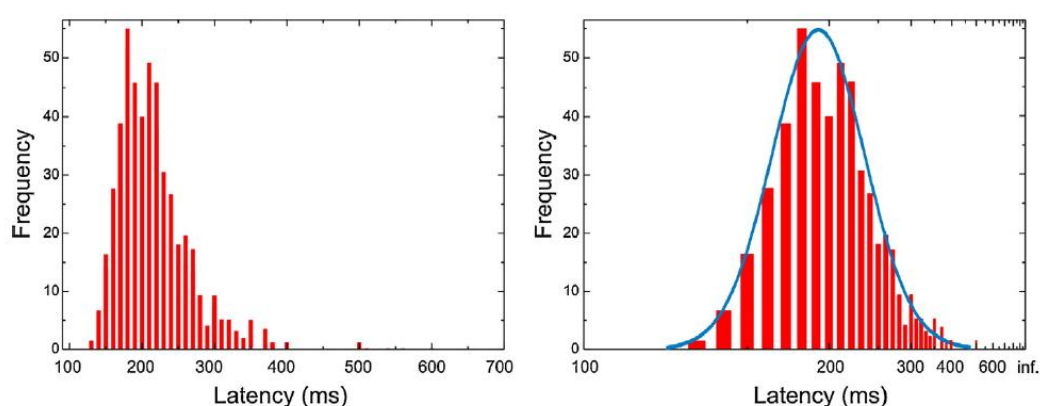
### 1.4.2 Temps de réaction et loi normale

Même dans les tâches les plus simples, comme bouger les yeux pour fixer une cible qui apparaît soudainement, les TR varient considérablement d'un essai à l'autre, même si la cible et les circonstances sont identiques à chaque fois (Noorani & Carpenter, 2016). Instinctivement, le TR est compris comme le tic-tac d'une horloge, puisque c'est ainsi qu'il est mesuré, cependant cette vision de la latence est fondamentalement trompeuse (Carpenter, 2012). L'auteur du modèle LATER s'est concentré, non pas sur le processus de mesure, mais sur ce qui est susceptible de se passer dans le système lui-même. Il en a déduit qu'il devrait y avoir un processus, initié par le stimulus, qui se poursuit à un certain rythme jusqu'à ce qu'il soit achevé. Il a mesuré que la variation des TR représente la variation du taux ( $r$ ) du processus sous-jacent. Afin d'étudier la

variation de ce taux, *Carpenter (1981)* a pensé le TR en termes de temps réciproque ( $1/TR = r$ ) et a découvert que ce dernier possédait une distribution normale ou gaussienne (cf. Figure 9). En d'autres termes, le TR suivrait une loi récinormale et s'avérerait obéir à la plus fondamentale de toutes les lois stochastiques. Un avantage non-négligeable de ce modèle est que le comportement d'un sujet pourrait être représenté avec seulement deux paramètres, la moyenne et la variance du taux,  $r(\mu; \sigma^2)$  (Noorani & Carpenter, 2016).

## Figure 9

*Comparaison graphique d'histogramme conventionnel et réciproque*

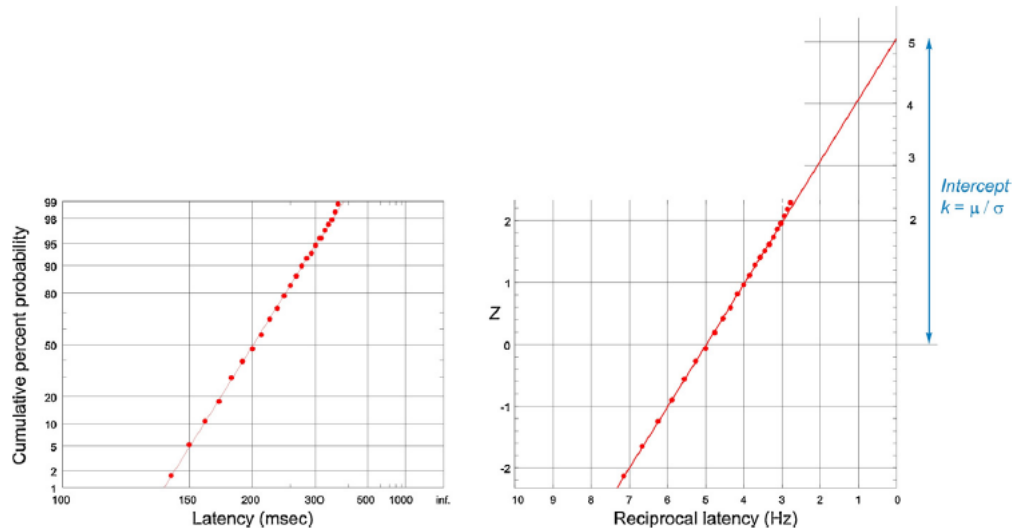


*Note.* À gauche, un histogramme de fréquence conventionnel, montrant l'asymétrie de la distribution des temps de latence. À droite, le même set de données réparti sur une échelle réciproque et une courbe gaussienne en bleu (Noorani & Carpenter, 2016).

Une façon commode de l'illustrer graphiquement consiste à tracer les histogrammes de latence cumulative sur une échelle de probits, avec un axe de temps réciproque - un *tracé réciprobit*. Lorsque les TR sont recinormaux, le graphique montrera une ligne droite (cf. Figure 10) (Carpenter, 1981).

**Figure 10**

*Graphique réciprobit*



*Note.* À gauche, les mêmes données que dans la figure précédente, représentées sous forme d'histogramme cumulatif, en utilisant une échelle probit (une transformation de la fonction d'erreur inverse) qui étire les extrémités de l'axe des ordonnées de manière à générer une ligne droite si les données sont effectivement gaussiennes ; puisque la latence utilise une échelle réciproque, il s'agit d'un graphique réciproque. À droite, le même tracé cumulatif utilisant des axes linéarisés alternatifs : l'échelle de latence est maintenant explicitement de latence réciproque ( $1/T$ ), augmentant vers la gauche pour faciliter la comparaison ; l'échelle de probabilité utilise des unités de  $Z$ . Les données peuvent être extrapolées jusqu'à un point d'interception  $k$  sur l'axe de droite ( $T = \text{infini}$  ou  $1/T = 0$ ), dont la valeur est  $\mu/\Theta$  en unités  $Z$  (Noorani & Carpenter, 2016).

#### **1.4.3 Les paramètres du modèle *LATER***

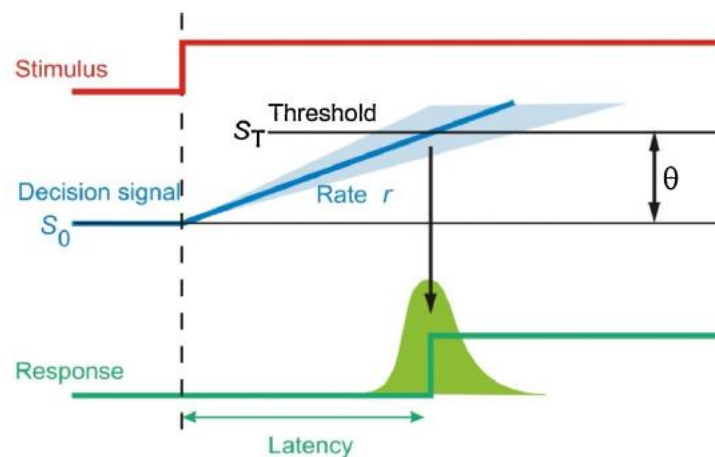
Le modèle *LATER* postule que le TR est le temps nécessaire pour qu'un signal  $S$ , en réponse à un stimulus, croisse linéairement depuis sa valeur initiale  $S_0$  jusqu'à sa valeur de seuil  $ST$  auquel une réponse est initiée. Si le taux de croissance de  $S$  est  $r$  et la différence entre la valeur initiale et la valeur de seuil est  $\Theta$  ( $\Theta = ST - S_0$ ), alors le TR serait donné par  $T = \Theta/r$  (cf. Figure 11). Si, sur différents essais,  $r$  varie aléatoirement, suivant une distribution normale avec une moyenne  $\mu$  et une variance  $\sigma^2$ , alors  $(1/T)$  serait également distribué normalement, générant la



distribution asymétrique familière de T. Ce modèle extrêmement simple expliquerait la procrastination qui sous-tend le processus décisionnel.

**Figure 11**

*Schéma du modèle LATER*



*Note.* Un signal de décision dont la valeur initiale est  $S_0$  commence à augmenter en réponse au stimulus à une vitesse constante  $r$  jusqu'à ce qu'il atteigne un seuil à  $S_T = S_0 + \theta$ , où il déclenche la réponse. Lors de différents essais,  $r$  varie de manière gaussienne avec une moyenne  $\mu$  et une variance  $\sigma^2$  ; en conséquence, la distribution de la latence (en vert) est asymétrique (Noorani & Carpenter, 2016).

La théorie de la vraisemblance implique une interprétation fonctionnelle claire des paramètres de ce modèle. Ce modèle postule l'existence d'un décideur neuronal idéal, dont l'activité  $S$  représenterait la probabilité logarithmique d'une certaine hypothèse, comme l'existence d'un but particulier dans le monde extérieur (Carpenter, 2012).  $S$  incarnerait une mesure de la croyance qu'une réponse particulière à un stimulus possible est nécessaire. Son taux moyen d'augmentation,  $r(\mu; \sigma^2)$ , reflèterait le taux d'accumulation d'informations.  $S_0$  serait lié à l'attente préalable que la réponse soit demandée.  $S_0$ , le niveau d'activité initial, représenterait le logarithme de la probabilité antérieure (prior) et pourrait être manipulé en modifiant la probabilité d'apparition d'un signal. La nécessité d'agir serait finalement acceptée lorsque  $S$  atteint le niveau de critère,  $S_T$ , qui correspondrait à un niveau de signification dans un test statistique, auquel la probabilité est si élevée qu'une réponse peut être justifiée. Si,  $S_0$  et  $S_T$  devaient changer d'une quantité

égale, la distribution des TR qui en résulterait ne serait absolument pas affectée, car  $\Theta$  reste constant. (Reddi & Carpenter, 2000).

#### 1.4.4 Mécanisme de décision bayésien idéal

Le modèle LATER devrait avoir une certaine base fonctionnelle : plus précisément, il devrait représenter un mécanisme plausible de prise de décision. Il est généralement admis que le cadre mathématique approprié pour prendre des décisions sur la base de données incertaines est un cadre bayésien. En général, il nous permet d'évaluer la probabilité  $p(H)$  d'un *mécanisme hypothétique*  $H$  en observant les *événements*  $E$  qu'il aurait pu provoquer.  $p(H|E)$  représente le processus d'inférence statistique qui sous-tend l'ensemble de la science empirique. Il représente aussi ce qui se passe en permanence dans nos systèmes sensoriels : percevoir, c'est juger de la probabilité d'hypothèses sur le monde extérieur à partir d'informations éparses et bruyantes, appelées *événements sensoriels*. Pour des réponses binaires, il est rare, dans un monde bruyant et incertain, que l'observation d'un seul événement suffise à prendre une décision valable concernant une hypothèse particulière : le plus souvent, un échantillonnage en série est nécessaire, et ce, avec une accumulation progressive de preuves jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment convaincantes. La *loi de Bayes* permet de déterminer la probabilité d'occurrence d'un événement à partir d'un autre événement interdépendant. À partir d'une hypothèse  $H$  et d'un événement  $E$  observé, cette loi stipule :

$$p(H|E) = p(H) \frac{p(E|H)}{p(E)}$$

$p(E|H)$  est la probabilité d'observer  $E$  si  $H$  est vrai. Elle est appelée la vraisemblance, tandis que  $p(E)$  est la probabilité d'observer  $E$  que  $H$  soit vrai ou non. Dans la pratique, la comparaison entre deux ou plusieurs hypothèses est habituelle, c'est pourquoi la loi de Bayes peut être utilisée sous la forme d'une probabilité. Puisque  $p(E)$  est difficilement estimable, il est souhaitable de l'extraire de l'équation. Ainsi, pour deux hypothèses alternatives  $A$  et  $B$  :

$$\frac{p(A|E)}{p(B|E)} = \frac{p(A)}{p(B)} \times \frac{p(E|A)}{p(E|B)}$$

Au fur et à mesure d'observations répétées, les rapports de vraisemblance se multiplient, c'est pourquoi, il est pratique d'utiliser cette dernière équation sous forme logarithmique, de sorte que la multiplication devienne une addition.

$$\log \text{cote postérieure} = \log \text{cote antérieure} + \log \text{rapport de vraisemblance}$$

La cote représente le ratio entre la probabilité d'occurrence d'un événement et la probabilité de son absence d'occurrence. Le *rapport de vraisemblance logarithmique* représente le degré

de soutien que les preuves ont apporté à A plutôt qu'à B, et il est additif. Au fur et à mesure de l'accumulation de preuves, ce rapport augmente à un rythme représentant la quantité d'informations obtenues à chaque fois et les chances logarithmiques en faveur de l'hypothèse correcte seront de plus en plus grandes (Noorani & Carpenter, 2016).

#### ***1.4.5 Justification du modèle LATER***

Un modèle n'est évidemment pas meilleur qu'une description empirique directe, à moins qu'il ne puisse être démontré qu'il a une certaine signification fonctionnelle et un certain degré de réalité (Carpenter, 1999). La manipulation des trois facteurs bayésiens sous-jacent,  $S_0$ ,  $r$  et  $ST$ , permettraient de justifier cette interprétation fonctionnelle du modèle LATER en tant que mécanisme décisionnel. Seuls deux types de variables expérimentales peuvent être modifiées : les variables circonstanciellles (telles que l'attente et l'urgence d'une réponse) qui affecteront  $S_0$  et  $ST$  (et donc  $\Theta$ ), et les variables du stimulus (telles que la luminance, le contraste, le bruit) qui affecteront  $r$ . L'étude de *Carpenter (1995)* présume confirmer les prédictions suivantes du modèle LATER sur les sujets humains.

Le modèle LATER prédit que si le prior  $S_0$  augmente, par exemple en faisant apparaître un stimulus plus souvent d'un côté que de l'autre, alors le TR se raccourcira proportionnellement à la probabilité logarithmique. Par conséquent, les pentes des graphiques réciproques devraient devenir plus faibles, pivotant autour d'un *point d'interception fixe*  $k$  (cf. Figure 12) (Noorani & Carpenter, 2016).

Étant donné que le seuil  $ST$  refléterait le niveau de confiance requis avant de s'engager dans un plan d'action particulier, le modèle LATER prédit que :

- 1) Si les sujets doivent produire une réponse très précise, le seuil sera très élevé.
- 2) Si les sujets doivent produire une réponse rapidement, le seuil sera faible.

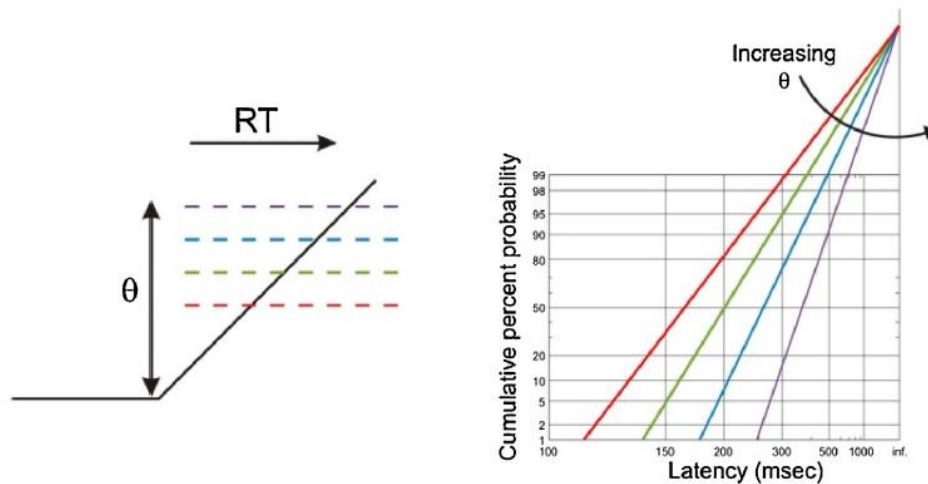
La variation de  $ST$  provoque le pivotement de la courbe du graphique réciproque autour d'un point d'interception infini fixe  $k$ . Si le changement du TR était dû à un changement de la vitesse moyenne de montée  $\mu$ , la ligne du diagramme de réciprocité subirait un déplacement parallèle et la pente restant constante.

Pour tout degré d'urgence particulier, un prior existe telle que le changement résultant de  $S_0$  soit identique au changement de  $ST$  dû aux instructions d'urgence. Puisque la distance que doit parcourir le signal  $S$  est alors la même dans les deux cas, la distribution des réponses urgentes à la cible à faible probabilité devrait être identique à celle des réponses non-urgentes à la cible à forte probabilité. L'urgence se traduit par un changement du niveau de "signification"

prédéterminé et, en général, ses effets comportementaux ne semblent pas pouvoir être distingués d'un changement de l'attente antérieure (Reddi & Carpenter, 2000).

**Figure 12**

*Illustration de l'influence du paramètre  $\Theta$  dans le modèle LATER*



*Note.* Relation entre le paramètre  $\Theta$  du modèle LATER et les paramètres du graphe réciproque. la variation de  $\Theta$  fait pivoter le tracé autour de l'intercepte infini (Noorani & Carpenter, 2016).

#### 1.4.6 Erreurs

Lorsque les sujets doivent prendre des décisions basées sur des informations probabilistes, ils commettent inévitablement des erreurs. Les erreurs d'omission sont une caractéristique inévitable : si le taux de croissance  $r$  suit une distribution normale, avec une moyenne  $\mu$  et une variance  $\sigma^2$ , alors  $r$  sera égal ou inférieur à 0, de sorte que  $S$  n'atteindra jamais  $ST$ . Cela correspond à l'existence de l'intercepte  $k$ , qui représente la probabilité que cela se produise.

Les erreurs de commission peuvent se produire de deux manières : sous forme de faux positifs et sous forme de choix incorrects dans les tâches de discrimination comportant plus d'un stimulus. Les premières sont attendues par la *théorie classique de la détection*, car elles représentent l'absence de signal, de sorte que  $\mu = 0$ . Le signal de décision croissant traversa quand même  $ST$  et déclencher une réponse. Les secondes erreurs peuvent être modélisées par deux unités LATER concurrentes avec différentes valeurs de  $\mu$ . Puisque la composante du taux d'augmentation est aléatoire, un  $\mu$  plus faible peut atteindre le seuil avant l'autre (Noorani & Carpenter, 2016).

#### ***1.4.7 saccades précoces et tardives***

Malgré l'homogénéité de la population et de la tâche, la variabilité inter-sujet, en termes de  $\mu$  et  $\sigma$ , est considérable, ce qui génère une certaine quantité de saccades précoces ou tardive. Les saccades précoces (inférieur à 200 ms) sont peu fréquentes et leur nombre croît en conditions d'attente élevée et d'urgence. Les saccades précoces s'avèrent particulièrement faciles à modéliser. C'est une unité LATER parallèle à l'unité principale qui possède une grande valeur  $\sigma$ , mais un  $\mu$  nul et qui parvient parfois à dépasser l'unité principale (Carpenter, 2012). Une explication plausible, qui n'a pas encore été prouvée, est que les saccades précoces sont dues à une voie rapide du tronc cérébral ou colliculaire, normalement maintenue sous contrôle par une inhibition tonique descendante du cortex qui est affaiblie dans des conditions de forte attente, d'urgence ou de distraction cognitive (Halliday & Carpenter, 2010; Reddi & Carpenter, 2000). À l'autre extrémité de la distribution saccadique, un phénomène équivalent aux saccades précoces se produit lorsqu'une sous-population de saccades aux latences inhabituellement longues existe. Leurs médianes étant souvent deux fois plus longue que celles de la distribution principale, elles peuvent donner lieu à une bimodalité. Elles sont fréquemment un signe de somnolence et d'inattention, souvent conscientisées par le sujet. Ces saccades tardives peuvent être modélisées, de la même manière que les saccades précoces. Elles représentent une deuxième unité LATER, en parallèle de l'unité principale, dont la valeur de  $\mu$  est bien plus faible et qui ne devrait normalement pas donner lieu à une réponse. Mais dans une proportion aléatoire d'essais, l'unité principale subit une sorte d'inhibition descendante et ne fonctionne pas, et c'est donc cette seconde unité "tardive" qui génère la réponse. Ce type d'inattention est observé dans les réponses manuelles ainsi que dans les saccades, et peut en soi être une indication de pathologie (Carpenter, 2012).

#### ***1.4.8 Différents types de saccades***

Les saccades peuvent être catégorisées comme réactives ou d'ordre supérieur. Les premières impliquent probablement, tout au plus, une quantité modeste de traitement cortical alors que les secondes impliquent, pour une exécution correcte, d'avantage de *délibération corticale*. Cette dichotomie se base sur la difficulté des conditions qui provoquent la saccade et la latence saccadique, c'est-à-dire le temps nécessaire pour provoquer une saccade en réponse à l'instruction.

***Saccades de ciblage.*** Les saccades de ciblage sont suscitées en demandant au sujet de regarder une nouvelle cible lorsqu'elle apparaît. Elles sont considérées comme réactives et ont des latences, chez l'Homme d'environ 200 ms. Le temps de latence peut varier selon l'intensité du

stimulus de la nouvelle cible et selon la disparition ou non de la cible de fixation. Si la cible de fixation disparaît, et/ou si la nouvelle cible est plus perceptible que la cible de fixation, alors le temps de latence sera plus court (Hopp & Fuchs, 2004).

***Saccades de balayages.*** Les saccades de balayages sont déclenchées de manière endogène dans le but d'explorer l'environnement visuel. Elles sont considérées comme réactives et ont des latences semblables aux saccades de ciblage. Elles sont assez semblables à ces dernières, à la différence que le point de fixation se déplace d'une saccade à l'autre sur les cibles stationnaires déjà présentes. Elles ont pour but de rassembler les informations d'une scène visuelle (Henderson & Ferreira, 2013).

***Les saccades de rattrapages.*** Les saccades de rattrapages sont des mouvements oculaires rapides, exécutés sans retour visuel qui sont combiné à des mouvement oculaires fluides comme stratégie pour suivre des objets en mouvement. Elles sont considérées comme réactives et leurs latences est légèrement inférieures aux saccades de ciblage (de Brouwer et al., 2002).

***Saccade guidée par la mémoire.*** Les saccades guidées par la mémoire sont provoquées par la brève présentation d'une cible dont le sujet doit se souvenir de l'emplacement pendant un certain temps avant d'effectuer une saccade vers celle-ci. Elles sont d'ordre supérieur et ont des latences bien supérieures à 200 ms après l'instruction de se déplacer. Il est probable que des étapes supplémentaires soient impliquées dans leur génération, par exemple se souvenir de la position de la cible et retarder l'initiation de la saccade, et qu'elles impliquent un traitement cortical plus important (Hopp & Fuchs, 2004).

***Les saccades retardées.*** Les saccades retardées sont effectuées par le sujet vers des cibles déjà présentes après un délai fixe. Elles sont d'ordre supérieur et ont une latence moyenne d'environ 300 ms. Lorsque les saccades sont retardées de plus d'une seconde, l'attention resterait liée à la cible de la saccade (Deubel & Schneider, 2003).

***Les anti-saccades.*** Les anti-saccades sont suscitées en demandant au sujet de regarder dans la position miroir de la nouvelle cible lorsqu'elle apparaît. Elles sont utilisées afin de tester les capacités d'un sujet à inhiber un comportement réflexe. À l'inverse des saccades réactives, elles nécessite de pouvoir dissocier le vecteur sensoriel, pointant en direction du stimulus, et le

vecteur moteur, dirigé dans la direction opposée (Panouillères, 2011). Elles sont d'ordre supérieur et ont des latences bien supérieur à 200 ms après l'instruction de se déplacer et un taux d'erreur significativement supérieur aux saccades réactives.

### 1.5 Objectif du travail

L'objectif de ce travail est d'observer l'évolution du temps de latence nécessaire pour effectuer une saccade oculaire par rapport à la probabilité d'apparition d'un stimulus latéral et de confirmer les résultats obtenus par *Carpenter (1995)*. Pour y parvenir, les questions posées sont les suivantes :

- 1) Est-ce que le temps de latence suit une loi réciprobit comme suggéré dans la littérature scientifique (Carpenter & Williams, 1995)?
- 2) Est-ce qu'il y a une évolution de la valeur ' $S0$ ' selon la probabilité d'apparition ?
- 3) Est-ce que les résultats de *Carpenter (1995)*, stipulant que plus la probabilité d'apparition d'un stimulus latéral est grande et plus le TR sera court, est-elle vérifiable ?

Afin d'analyser scientifiquement ces quatre questions, les hypothèses de recherche sont les suivantes :

1. Hypothèse de la réciprobité du temps de latence :  
H10 : le temps de latence ne suit pas une loi réciprobit.  
H11 : le temps de latence suit une loi réciprobit.
2. Hypothèse sur l'évolution de la valeur de ' $S0$ ' selon la probabilité d'apparition :  
H20 : Il n'y a pas d'évolution de la valeur de ' $S0$ ' selon la probabilité d'apparition.  
H21 : Il y a une évolution de la valeur de ' $S0$ ' selon la probabilité d'apparition.
3. Hypothèse de vérifiabilité des résultats de *Carpenter (1995)* sur la corrélation entre le TR et la probabilité d'apparition d'un signal :  
H30 : Les résultats de Carpenter ne sont pas vérifiables.  
H31 : Les résultats de Carpenter sont vérifiables.

## 2 Méthode

### 2.1 Échantillon

Au total 25 participants (13 hommes et 12 femmes), âgés entre 21 à 30 ans (cf. Tableau 1), sélectionnés aléatoirement et issus d'un cursus universitaire, ont participé à cette expérience. Pour répondre aux exigences du design de l'étude, aucun des sujets ne présentait de maladie neurodégénérative, tous étaient présumés avoir une bonne plasticité cérébrale et tous possédaient une vision normale avec ou sans correction.

Afin d'éviter le biais de confirmation d'hypothèse, aucun d'entre eux ne fut mis au courant de l'objectif de l'expérience.

Chaque participant a pris connaissance du déroulement de l'expérience et a librement signé, de manière anonyme, le formulaire de consentement relatif à cette expérience. Ils étaient tous conscients qu'ils pouvaient retirer leur participation à l'étude à n'importe quel instant, et ce, sans justification ni conséquence quelconque.

**Tableau 1**

*Informations concernant l'échantillon*

	Expérience
Participant [N]	25
Sexe [H/F]	13/12
Âge [ans]	25,2 ± 2,5
Correction visuelle [nb]	6
Correction visuelle G	3,2 ± 2
Correction visuelle D	3,6 ± 1,8

*Note.* L'âge et les corrections visuelles sont indiqués en moyenne ± l'écart type

### 2.2 Matériel expérimental

Cette étude s'est déroulée dans une pièce obscure sans fenêtre et isolée du bruit par des murs de briques. Cette étude a nécessité, une chaise à dossier, un stabilisateur de tête, un ordinateur, un programme informatique, un écran, un clavier, une souris et un eye tracker (cf. Figure 13). L'eye tracker était du modèle « *Tobii pro Spectrum* » et sa fréquence de rafraîchissement est fixée à 300 Hz. L'écran sur lequel s'est déroulé l'expérience était du modèle « *EIZO FlexScan EV2451* », de type « IPS, LED backlight » et de 3.8 kg de masse. Sa taille était de 23,8 pouces avec une résolution de 1920 x 1080 pixels, un ratio de 16:9 et un temps de réponse de 5 ms. Le

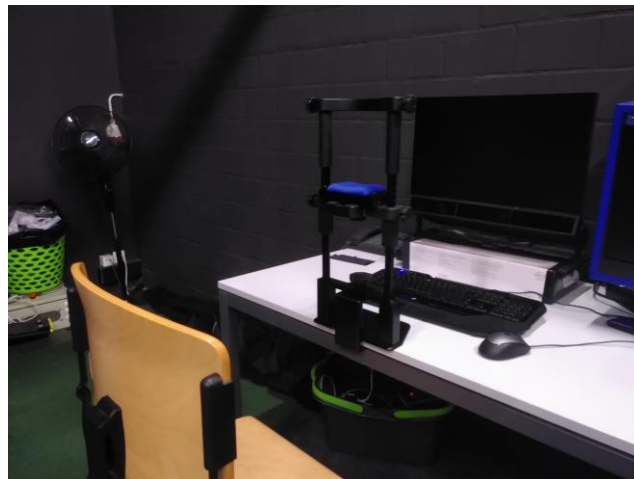


programme informatique, développé par le Dr. Julien Audiffren, appartenait à l'université de Fribourg. Les stimuli rouges présentés à l'écran étaient de couleur 255,0,0 RGB d'un contraste de 0,2 sur fond gris de couleur 127,127,127 RGB et d'une luminance approximative de 140 lumens (cf. Figure 14).

Cette étude s'étant déroulée pendant la pandémie du COVID-19, nous avons suivi une procédure sanitaire spéciale. Toutes les personnes présentes dans la salle devaient porter un masque chirurgical et devaient se désinfecter les mains au gel hydroalcoolique. J'ai désinfecté le matériel avant chaque utilisation.

### **Figure 13**

#### *Matériel expérimental*



### **2.3 Procédure expérimentale**

Dans une pièce obscure, les participants assis avec le dos droit sur une chaise à dossier apposaient leur menton sur un stabilisateur de tête, afin d'avoir les yeux à 60 cm de l'écran sur lequel se déroulait l'expérience. Ils devaient effectuer deux tâches avant de pouvoir commencer l'expérience proprement dite. Pour lancer cette première phase qui avait pour but de personnaliser le calibrage de l'eye tracker ''Tobii pro Spectrum'', ils devaient appuyer sur la touche espace du clavier, sans la percevoir. Ils devaient fixer un point blanc d'environ 0,5 cm qui apparaissait sur la ligne médiane de l'écran à environ 16 cm du centre, et ce, jusqu'à ce qu'il disparaisse. L'opération était ensuite répétée pour le côté opposé. Ce calibrage était ensuite enregistré pour la deuxième tâche et l'expérience. La deuxième étape servait à la calibration du programme informatique créé par le laboratoire. Pour ce faire, les sujets devaient appuyer, à l'aveugle, sur la touche espace du clavier lorsque leur regard fixait le point rouge. Il y avait au total 3 points,

le premier au centre, le second à environ 16 cm sur la gauche et le dernier à équidistance sur la droite. Les deux calibrages étant effectués, l'expérience pouvait commencer. Pour lancer l'expérience, lorsque le sujet était prêt, il appuyait, à l'aveugle, sur la touche espace pour lancer un bloc. Il devait alors effectuer huit blocs de 150 saccades oculaires lorsque les stimuli apparaissaient. S'il le souhaitait, le sujet pouvait prendre une pause entre deux blocs.

Les sujets devaient effectuer une tâche de saccade guidée visuellement pendant que leurs temps de réaction oculaires étaient enregistrés. La position de départ des sujets était déterminée par le regard porté sur le point rouge central, qui restait visible durant toute la durée du bloc. Les points apparaissaient, après un temps d'attente aléatoire situé entre 0,4 et 1,5 seconde, sur les zones de la seconde calibration (cf. Figure 14). Lorsque le point apparaissait, en effectuant uniquement une rotation de 15° des globes oculaires, ils devaient effectuer une fovéation sur le nouveau stimulus visuel. Lorsque le regard atteignait la cible, le stimulus disparaissait et le regard du sujet devait revenir à sa position de départ. Lorsque le point rouge central était à nouveau fixé, le décompte du temps d'attente aléatoire jusqu'à l'apparition de la nouvelle cible était déclenché. Les actions effectuées par le sujet étaient les mêmes pour chaque bloc, seules les probabilités d'apparition des stimuli latéraux étaient modifiées.

La variable expérimentale était la probabilité d'apparition latérale des cibles. Le programme était codé de manière à ce que les deux premiers blocs aient une probabilité d'apparition des stimuli latéraux équilibrée (50 -50 %), les trois suivants avec un ratio déséquilibré de 2 : 1 (66 - 33 %) et les trois derniers blocs avec un ratio déséquilibré de 9 : 1 (90 -10 %). Le déséquilibre des probabilités d'apparition n'était pas connu du sujet et le côté dominant (gauche ou droit) était aléatoirement alterné. Le programme informatique se fermait seul lorsque les 1200 saccades avaient été effectuées, laissant apparaître le fond d'écran de l'ordinateur. Les données étaient automatiquement enregistrées dans un fichier en format *comma separated values* (.csv). La durée totale de l'expérience, explications incluses, était approximativement de 60 min. Les résultats d'un sujet ont été recueillis au cours d'une seule session afin de réduire l'effet de la variation à long terme de la latence.

## Figure 14

*Aperçu de l'écran expérimental*



*Note.* À gauche la position de départ. À droite l'apparition du stimulus côté droite.

Dans ce fichier, nous trouvons les informations suivantes (cf. Figure 15):

La première ligne (*Subject :*) indique le numéro du sujet que j'attribuais à chaque participant. La deuxième ligne (*Bloc\_id :*) indique le numéro du bloc dont les données proviennent. Les huit blocs sont numérotés de 0 à 7. La troisième ligne (*Date :*) comporte la date à laquelle l'expérience est effectuée. La quatrième ligne (*Main\_side :*) indique le côté dominant pour les blocs 5 à 7 de la condition 80 %. La cinquième ligne indique le nom des 5 variables enregistrées qui sont séparées par une virgule. Dans l'ordre : un espace nul représentant le n° de la saccades (incrémenté de 0 à 149) ; *stimulus\_side* : le côté duquel le stimulus est simulé par le programme information (RIGHT ou LEFT) ; *stimulus\_latency* : le temps que met la cible à apparaître (compris entre 0,4 et 1,5 secondes) ; *saccadic\_side* : le côté duquel le sujet a effectué une saccade (RIGHT ou LEFT) ; *saccadic\_latency* : le temps de réaction du sujet pour qu'il déplace son regard sur la nouvelle cible. Puis les données étaient enregistrées chaque seconde ligne selon les variables précédemment citées.

## Figure 15

*Illustration de l'apparence des données enregistrées*

Subject:1
Bloc_id:0
date:2021_Dec_02_0911
main_side:RIGHT
,stimulus_side,stimulus_latency,saccadic_side,saccadic_latency
0,RIGHT,0.4,RIGHT,0.5016766000189818

## 2.4 Analyse statistique des données

Dans le cadre de l'analyse statistique des données, la variable indépendante représente les différentes probabilités d'apparition de la cible gauche droite : 20 % du côté secondaire (90 observations), 33 % du côté dominant (150 observations), 50 % à droite (150 observations), 50 % à gauche (50 % d'observations), 66 % côté secondaire (300 observations) et 80 % côté dominant (360 observations). Les observations représentaient la variable dépendante, c'est-à-dire le temps de latence saccadique ou le temps de réaction TR.

La première action nécessaire est de filtrer les observations par condition :

- a. Quantifier le nombre de saccades contralatérales à l'apparition du stimulus.
- b. Quantifier et supprimer les saccades précoces ( $< 200$  ms).
- c. Quantifier et supprimer les saccades tardives ( $> 600$  ms).

J'ai dû retirer 2 sujets de l'expérience, car à cause d'un crash du programme informatique, les données récoltées n'étaient pas en quantité suffisante pour y effectuer de quelconques tests statistiques.

Pour la première hypothèse, j'ai utilisé le programme SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*). J'ai effectué ce filtrage, puis j'ai calculé la réciproque,  $T$ , des valeurs. J'ai appliqué analyse descriptive sur  $T$ , représentée numériquement dans un tableau et graphiquement à travers une boîte à moustache. De plus, j'ai effectué un test de normalité à l'aide du test de Shapiro-Wilk avec un niveau de significativité de 0,05 et j'ai graphiquement comparé la distribution de  $T$  à une distribution normale. Suite à ce test, j'ai voulu observer grâce au test paramétrique  $T$  de Student non-apparié bilatéral à 95 % pour les répartitions gaussiennes et au test non-paramétrique  $U$  de Mann-Whitney à 2 échantillons indépendants pour les autres, si les saccades effectuées dans les conditions 50 % gauche et droite appartenaient à la même population.

Pour répondre à la seconde hypothèse, j'ai rassemblé les observations filtrées de  $T$  par bloc contenant de 34 à 67 observations pour 3 conditions (50, 66 et 80 %). Puisqu'il est impossible de mesurer ou de calculer précisément la valeur de  $S_0$  et comme la valeur  $ST$  est supposée constante, car le degré d'urgence ne change pas, à partir de l'équation  $ST - S_0 = \Theta$ , j'ai tenté d'observer la variation de  $S_0$  à travers le calcul de  $\Theta$ . J'ai calculé la moyenne  $\mu$  de chaque bloc que j'ai multiplié avec chaque observation  $T$  afin d'obtenir la valeur de  $\Theta$  pour chaque observation. Puis j'ai calculé la moyenne de  $\Theta$  pour chacun des 6 blocs sous les 3 différentes conditions, ce qui m'a donné 18 valeurs de  $\Theta$  par sujet. Étant donné que la répartition de mes données n'était pas gaussienne, j'ai effectué le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman puis trois tests  $U$  de Mann-Whitney à 2 échantillons pour comparer les conditions entre elles.

### 3 Résultats

Le tableau 2 montre le résultat par sujet de l'appartenance ou non à la même population des distributions des inverses du TR des conditions 50 % gauche et 50 % droite. J'ai choisi les tests à appliqués (T de Student ou U de Mann-Whitney), selon si la distribution des deux conditions était gaussienne ou non. J'ai trouvé cette dernière information grâce aux résultats du test de Shapiro-Wilk effectué en amont (cf. annexe 1). Avec un seuil de signification  $\alpha = 0,05$ , ce tableau illustre que les deux conditions à 50 % des sujets 3, 4, 7, 9, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 22, 24 et 25 ne peuvent pas exclure l'hypothèse  $H_0$ . Les résultats des sujets 2, 5, 6, 8, 11, 12, 15, 20 et 21 permette d'exclure l'hypothèse  $H_0$ , car leur  $p$  value est inférieure au seuil de signification  $\alpha$ .

**Tableau 2**

*Les résultats des tests d'appartenance à la même population pour les conditions 50 % gauche et 50 % droite*

Sujet	2	4	6	9	11	12	16	23
<b>Sig.* T de Student</b>	<0,01	0,82	<0,01	0,816	<,001	0,018	0,304	0,02

Sujet	3	5	7	8	13	14	15	17
<b>Sig.* U de Mann-Whitney</b>	0,818	0,001	0,603	0,017	0,914	0,066	0,028	0,118

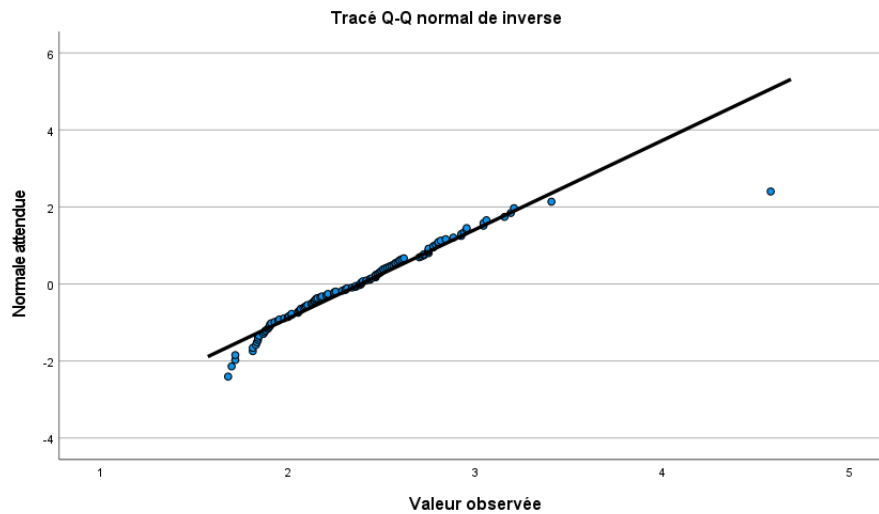
Sujet	18	19	20	21	22	24	25
<b>Sig.* U de Mann-Whitney</b>	0,966	0,607	0,001	0,001	0,136	0,426	0,111

*Note.* Le niveau de risque des test T de Student et U de Mann-Whitney est de 5 %.

La figure 16 permet une observation subjective des résultats sur la distribution des observations d'une condition. Elle illustre la comparaison de la distribution T du sujet 5 pour la condition 50 % gauche à une droite représentant une distribution gaussienne idéale. Sur cette figure, la majorité des points coudoient la droite normale à l'exception des deux valeurs les plus hautes et des valeurs les plus basses.

**Figure 16**

*Illustration du Q-Q plot pour le sujet 5 pour la condition 50 % gauche*



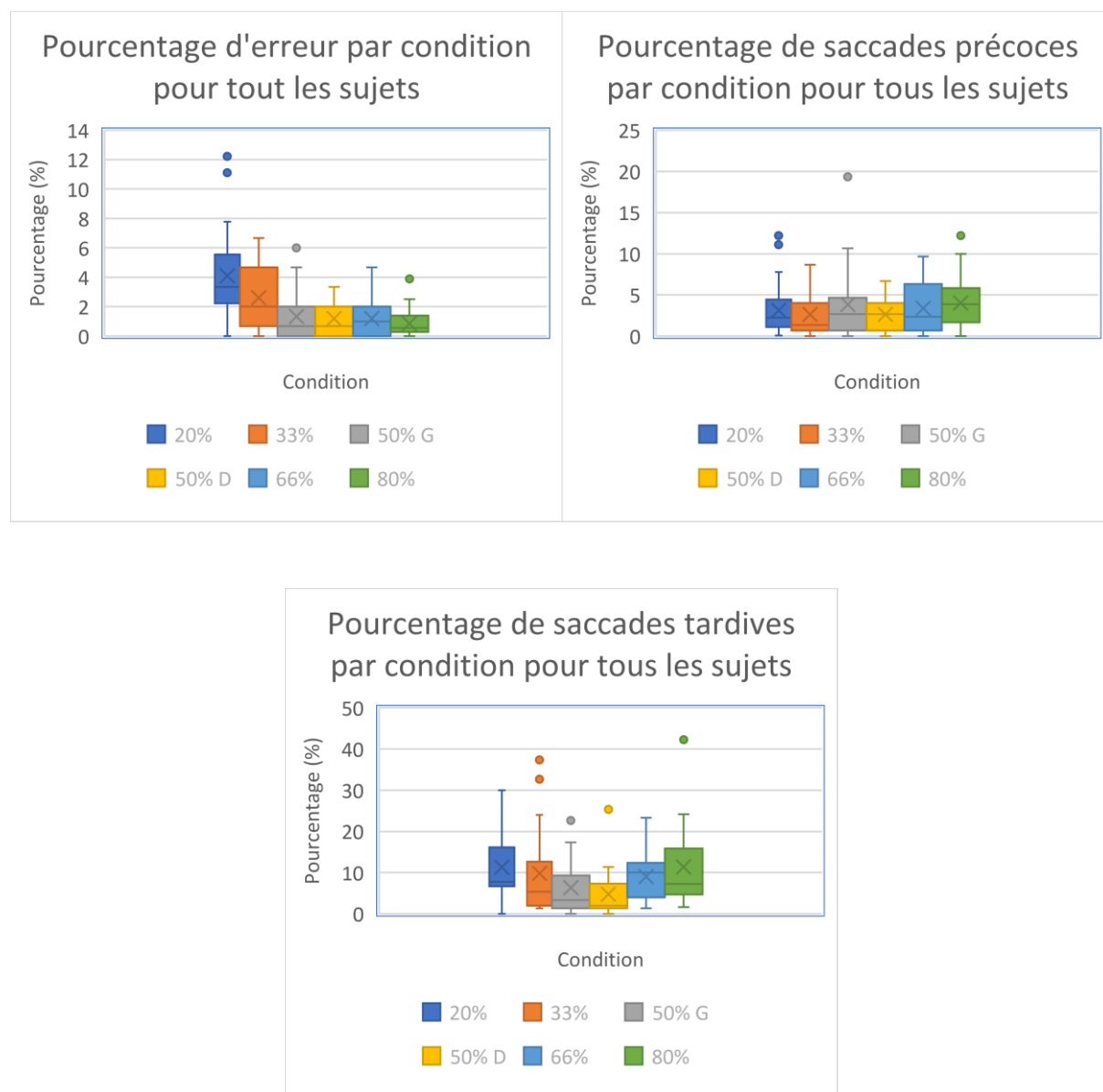
*Note.* La ligne noire représente une distribution Gaussienne parfaite. Le test de normalité pour ces données a donné un  $p$  value  $< 0,01$  pour le test de Shapiro-Wilk et de 0,2 pour le test de Kolgomorov-Smirnov après une correction de signification de Lilliefors.

Le tableau 3 représente, à travers un tableau récapitulatif et une représentation sous forme de barre d'erreur, la moyenne en pourcentage des erreurs, des saccades précoces et des saccades tardives pour tous les sujets. L'erreur moyenne tend à se réduire avec l'augmentation des priors, la moyenne des saccades précoces est groupée et est inférieure à 5 % et la moyenne des saccades tardive croît au fur et à mesure qu'on s'écarte de la condition équilibrée.

**Tableau 3**

*Les résultats du filtrage*

Condition	20 %	33 %	50 % G	50 % D	66 %	80 %
<b>Moyenne Erreur (%)</b>	4,11	2,61	1,33	1,19	1,20	0,85
<b>Moyenne Saccades précoces (%)</b>	3,10	2,64	3,83	2,64	3,37	4,01
<b>Moyenne Saccades tardives (%)</b>	11,21	9,80	6,32	4,78	9,06	11,34



**Note.** Les valeurs présentées dans ce tableau représentent la moyenne des erreurs (saccade contralatérale à l'apparition du stimulus), des saccades précoces (TR < 200 ms) et des saccades tardives (TR > 600 ms) réparties selon 6 conditions.

Dans le tableau 4, figure les résultats du pourcentage de distribution normale selon les conditions. Les deux priors les plus élevés ont le plus bas pourcentage (11 %), alors qu'il semble groupé autour de 40 % pour les 4 autres priors.

**Tableau 4**

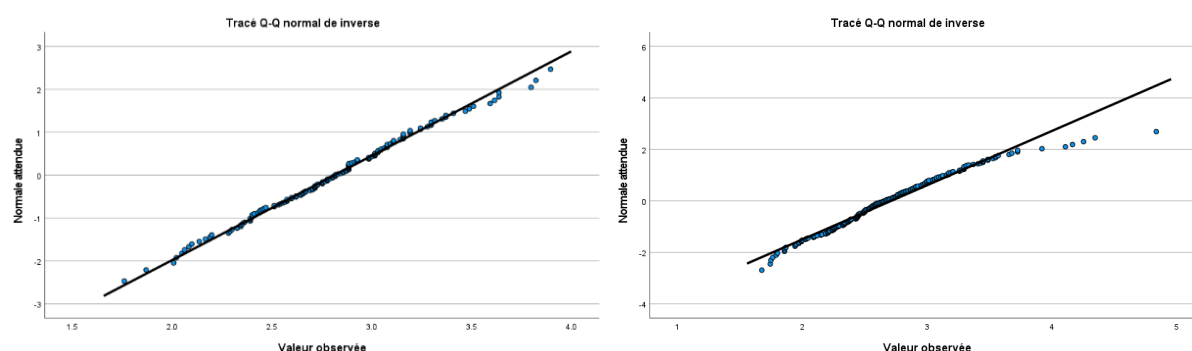
*Tableau de % de distribution normale par condition*

Condition	20 %	33 %	50 % G	50 % D	66 %	80 %
% de distribution normale	44,44	50	33,33	44,44	11,11	11,11

La figure 17 permet une observation subjective des résultats sur la distribution des observations d'une condition. Elle illustre la comparaison de la distribution T du sujet 9 pour la condition 50 % gauche à sa condition 66 %. Avec, comme référentiel, une droite qui représente une distribution normale idéale. Visuellement, il y a une différence de distribution selon les conditions et elle s'observe au niveau des valeurs minimums et maximums, qui dans la condition 66 % sont plus écartées de la droite gaussienne de référence.

**Figure 17**

*Tracé Q-Q de T pour les conditions 50 % gauche et 66 % du sujet 9*



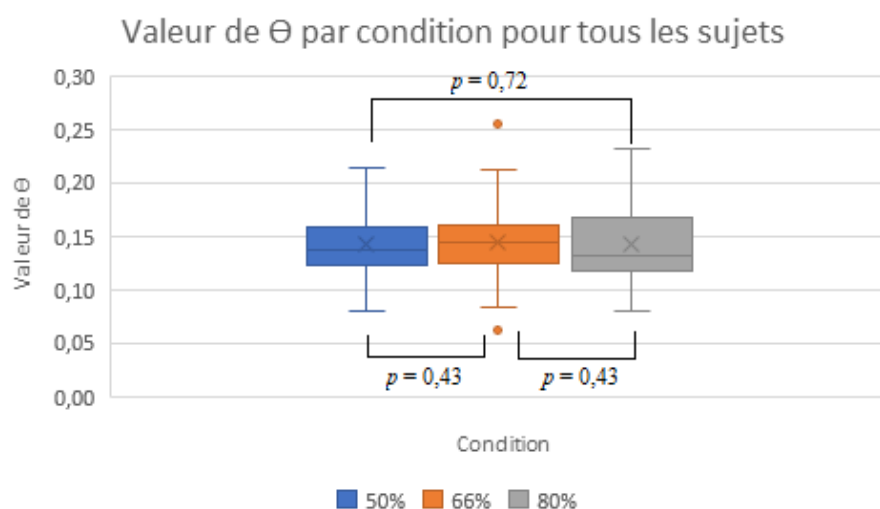
*Note.* Tracé Q-Q de T du sujet 9 pour les conditions 50 % gauche (à gauche) et 66 % (à droite)



Le tableau 5 représente les résultats de la distribution et de la comparaison de la valeur  $\Theta$  de tous les sujets pour les conditions 50, 60 et 80 %. La distribution apparaît semblable sur le graphique. La  $p$  value du test non-paramétrique U de Mann-Whitney est supérieure au seuil  $\alpha = 0,05$ .

**Tableau 5**

*Boîte à moustache de la distribution de  $\Theta$  et de sa  $p$  value pour tous les sujets selon les conditions 50, 60 et 80 %*



*Note.* La  $p$  value est obtenue par le test U de Mann-Whitney après avoir obtenu une  $p$  value de 0,76 au test ANOVA de Friedman.

## 4 Discussion

Le but de ce travail était de retrouver les résultats de *Carpenter (1995)* quant à la distribution récinormale des TR, l'évolution de S0 selon les différentes conditions et étudier la corrélation entre les priors et S0. Les résultats obtenus ne me permettent pas de rejeter les H10 et H20. Le rejet de l'hypothèse H20 étant une condition nécessaire à l'étude de la troisième hypothèse, cette dernière n'a pas pu être explorée.

### 4.1 Est-ce que les échantillons de l'œil gauche et de l'œil droit dans la condition à 50 % appartiennent-ils à la même population ?

La pertinence de cette étude réside dans la nécessité d'avoir une seule population de données pour la condition à 50 % pour l'investigation de H2. Une analyse superficielle des comparaisons des échantillons gauche et droite dans la condition à 50 % (cf. Tableau 2) montre que dans 60 % des cas ces échantillons appartiennent à la même population. Cette faible valeur ne permet pas d'affirmer que les 2 échantillons appartiennent à la même population. Puisqu'il y a des différences de perception entre l'œil dominant et l'œil secondaire (Ehrenstein et al., 2005), il serait possible que cette différence affecte le TR.

Le choix de l'application des tests paramétriques ou non-paramétrique pour vérifier l'appartenance à une même population, peut être remis en cause, car tout test de normalité à ses limites. Certaines distributions comme par exemple celle du sujet 5 (cf. Figure 16) dans la condition 50 % gauche, peuvent être désignées comme gaussienne par le test de Kolgomorov-Smirnov et non-gaussienne par le test de Shapiro-Wilk. Alors que sur le graphique Q-Q, la grande majorité des points touche la droite normale. Les points externes à cette droite se situent dans les extrêmes. Peut-être qu'en affinant le filtrage, il serait possible d'obtenir des échantillons plus homogènes.

### 4.2 Le pourcentage d'erreur

Pour chaque condition, le pourcentage d'erreur a été rapporté dans un tableau et sa répartition a été illustrée dans une boîte à moustache (cf. Tableau 3). Il s'élève à 4,11 % pour la condition 20 %, à 2,62 % pour la condition 33 %, à respectivement 1,33 % et 1,19 % pour les conditions 50 % gauche et droite, à 1,2 % pour la condition 66 % et à 0,85 % pour la condition 80 %. Les résultats propres à chaque individu se trouvent dans l'annexe 2. À partir d'une étude superficielle, le pourcentage moyen d'erreur semble diminuer avec l'augmentation des priors. Sans étude approfondie, cette analyse est purement spéculative.

Une explication pourrait se trouver dans la théorie de l'existence de saccades précoce anticipatoires qui proviendrait directement du CS (Halliday & Carpenter, 2010; Reddi & Carpenter, 2000), et ce, pour deux raisons : la première est, que la grande majorité des saccades précoces sont des erreurs, car il n'y aurait pas eu de traitement d'ordre supérieur afin de s'assurer que le mouvement était la meilleure décision. La seconde est que plus l'écart de probabilité d'apparition du stimulus latéral est grand (par exemple 20 % gauche et 80 % droite) et plus le sujet va effectuer de saccades unilatérales et donc anticiper l'apparition de la cible du côté controlatéral. C'est-à-dire qu'un sujet, après avoir effectué 5 saccades du côté majoritaire, se dit inconsciemment que la prochaine cible devrait logiquement apparaître de l'autre côté. De plus, plusieurs sujets m'ont avoué qu'ils n'arrivaient plus à percevoir l'apparition de la cible (l'écran leur paraissait uniformément gris) et qu'après un certain temps, ils effectuaient une saccade aléatoire pour s'assurer qu'il y avait effectivement une cible.

Cependant, il faudrait faire des tests supplémentaires pour se permettre de tirer des conclusions, car la moyenne s'accompagne aussi de quelques biais. Premièrement, la sensibilité aux valeurs extrême. D'un côté, dans 20 % des cas, les sujets, selon une condition, ont fait 0 erreur, mais de l'autre côté, dans 20 % des cas les sujets ont fait 6 erreurs ou plus (jusqu'à 14). Deuxièmement, la moyenne est également sensible à la taille de l'échantillon. Alors que le pourcentage d'erreur chez le sujet 18, qui a fait 14 erreurs dans la condition 80 % (environ 360 données), s'élève à 3,89 %, il est de 3,33 % chez le sujet 21, qui n'a uniquement fait 3 erreurs dans la condition 20 % (environ 90 données). De plus, il est impossible discriminer le type (faux positif ou choix incorrecte) d'erreur de commission produit. L'étude des erreurs ne me semblait pas être pertinente pour ce travail, cependant pour de futures expériences, je pense qu'il serait judicieux d'effectuer des tests de comparaisons de moyenne ainsi que d'étudier les relations entre les erreurs et les saccades précoces ou tardives ou une étude qui permettrait de discriminer le type d'erreur de commission.

#### **4.3 Le pourcentage de saccades précoces et tardives**

Les deux problèmes liés à la moyenne citée au point 4.2 sont également à prendre en compte pour ce point. De plus, si la variabilité inter-sujet (Carpenter, 2012) est vraie, il est possible que ce pourcentage (cf. Tableau 3) ne soit pas informatif. Si la moyenne ou l'écart-type varie fortement d'un sujet à l'autre (ce qui ne semble pas être le cas de la majorité de mes observations), il serait possible que des observations se retrouvent exclues par mon filtrage et viendrait augmenter ou réduire le nombre de saccades précoces ou tardives. Afin de remédier à ce point, il

faudrait faire deux études à part en appliquant un filtrage personnalisé. Pour les saccades précoces, il faudrait imaginer une étude comprenant une unité LATER avec une valeur  $\mu=0$  et pour les saccades tardives, une étude sur la bimodalité créée par celle-ci (Carpenter, 2012). Cependant, le biais de confirmation me fait douter de la pertinence de cette étude.

Selon les résultats du tableau 3, aucune tendance ne peut être observée pour les saccades précoces, cependant elles restent négligeables, car elles sont inférieures à 5 % comme observées par *Carpenter (1995)*. Cependant, selon ces résultats, leur pourcentage devrait croître suivant l'augmentation des priors, ce qui ne se retrouve pas dans mes résultats. La moyenne est de 3,10 % pour la condition 20 % ; 2,64 % pour la condition 33 % ; 3,83 % pour la condition 50 % gauche ; 2,64 % pour la condition 50 % droite ; 3,37 % pour la condition 66 % ; de 4,01 % pour la condition 80 %. Les résultats propres à chaque individu se trouvent dans l'annexe 2. Je pense qu'il faudrait étudier la bimodalité provoquée par ces saccades précoces afin de pouvoir déterminer le TR qui leur est propre pour ensuite filtrer les résultats et non le contraire. La valeur de 200 ms a été fixée approximativement selon une estimation qui nous paraissait être correcte. Dans une hypothèse purement spéculative, il serait possible que je n'aie pas pu retrouver les résultats de *Carpenter (1995)* car mon filtrage n'était pas correct. Il serait intéressant refaire mes statistiques en considérant que les 5 % des TR les plus courts sont des saccades précoces.

En ce qui concerne les saccades tardives, le tableau 3 montre une augmentation croissante des saccades tardive au fur et à mesure qu'on s'écarte de la condition 50 % tout en préservant une certaine cohérence pour les 3 conditions (environ 5 % pour 50 % ; 9,5 % pour 33-66 % ; 11,3 % pour 20-80 % ; les résultats propres à chaque individu se trouvent dans l'annexe 2). Elle pourrait s'expliquer par l'effet de somnolence observée par *Carpenter (2016)* et avouée par certains sujets. De plus, plusieurs sujets m'ont avoué qu'ils n'arrivaient plus à percevoir la cible et qu'après un certain temps, ils effectuaient une saccade aléatoire pour s'assurer qu'il y avait effectivement une cible. Afin de réduire le pourcentage de réponse tardive, il serait possible de réduire la durée de l'expérience ou d'effectuer une pause plus conséquente entre les blocs.

#### **4.4 H1 : La réciprobité du temps de latence**

Du test Shapiro-Wilk effectué par condition sur chaque sujet, il ressort qu'un seul sujet (sujet n° 2) a une distribution du TR récinormale pour au moins 5 des 6 priors (cf. Annexe 1). De plus, le prior qui possède le plus haut taux de pourcentage de distribution normale selon le test de Shapiro-Wilk, n'est que de 50 %. Ce qui ne me permet pas de conclure que le TR suit une loi récinormale. Le Tableau 4, montre le pourcentage de distribution normale pour chaque

condition. La tendance régressive du pourcentage de distribution normale alors que la probabilité d'apparition augmente n'est pas clair, malgré qu'elle soit d'environ 50 % pour les conditions 20 et 30 %, d'environ 40 % pour les conditions à 50 % et de 11,11 % pour les conditions de 66 et 80 %. Pour toutes les conditions, les chiffres indiqués sont une moyenne de 23 valeurs. Hors-mis les problèmes liés à la représentation statistique par la moyenne, le changement d'une seule condition modifiera le pourcentage de 4,33 %. C'est-à-dire qu'il n'y a que trois résultats différents entre la condition 50 % gauche (33,33 %) et la condition 33 % (50 %). Il faudrait au moins deux fois plus de données pour être sûr que leurs résultats sont significativement différents. La différence des deux conditions à 50 % peut-être expliquée par le fait que les données n'appartiennent pas à la même population, toutefois, je retombe sur la même problématique du nombre d'échantillons. Il est intéressant de noter que pour les plus grands priors (66 et 80 %), le pourcentage est plus bas que pour le reste. Si le TR suivait effectivement une loi récinormale, je devrais observer le contraire, car plus il y a de données et plus la distribution devrait être normale pour un processus supposé stochastique. Je suis parti du présupposé que ce qui se trouve dans la littérature était correct, cependant pour une étude future, il serait important de déterminer si le processus est réellement stochastique comme testé par *Carpenter (1995)* en effectuant un test de  $\chi^2$ .

Pour une analyse subjective des tracés Q-Q de la figure 17 pour les conditions 50 % gauche et 66 % du sujet 9 et de la figure 16 pour la condition 50 % gauche du sujet 5, il apparaît que ce sont les plus grandes valeurs qui s'éloignent le plus de la droite gaussienne. Ces valeurs représentent les TR les plus courts, peut-être qu'en affinant le filtrage, il serait possible de trouver une distribution normale. C'est-à-dire que l'estimation du temps des saccades précoces me paraît être erronée. Selon les études de *Carpenter (1995 ; 200 ; 2012 ; 2016)*, la classification des saccades précoces ne se fait pas à un temps fixe comme je l'ai fait. De plus, les stimuli de cette expérience étaient moins perceptibles que ceux de l'expérience de *Carpenter (1995)*, je pense que cela explique le  $\mu$  plus grand obtenu et je suppose que cela provoque également une plus grande variabilité  $\sigma$ . Peut-être qu'en étudiant en premier lieu la bimodalité des saccades précoces afin de pouvoir appliquer le bon filtre à l'analyse statistique de mes données, je parviendrais à reproduire les résultats de la littérature scientifique.

#### 4.5 H2 : Corrélation entre TR et priors

Le tableau 5 montre qu'il n'y a pas de différence significative entre la valeur moyenne de  $\Theta$  (et par extension de  $S_0$ ) entre les trois différentes conditions. La valeur moyenne de  $\Theta$  pour tous les sujets se trouve en annexe 3. La significativité du test de l'ANOVA de Friedman de 0,76 montre que les échantillons ne proviennent pas significativement de population différente, ce qui est subjectivement confirmé avec le graphique et objectivement par les *p value* du test U de Mann-Whitney (0,43 pour les conditions 50 et 60 % ; 0,72 pour les conditions 50 et 80 % ; 0,43 pour les conditions 60 et 80 %). Il est possible que l'absence de récinormalité des TR en soit responsable. Les raisons précises de cette absence de signification ne peuvent pas être affirmées avec certitude, néanmoins quelques hypothèses pourraient corroborer ce résultat. En premier lieu, les différences entre l'expérience menée par *Carpenter (1995)* et celle-ci. Premièrement le nombre de saccades effectuées par condition, alors que ma quantité maximale de saccades enregistrée était de 360 pour la condition 80 %, *Carpenter (1995)* en a enregistré 530 pour sa quantité minimale (et 10'969 pour sa quantité maximale). Il est reconnu que plus un processus aléatoire est répété et plus sa distribution tend à prendre une forme ressemblant à une distribution parfaite. Peut-être que le résultat serait autre si les sujets avaient dû effectuer plusieurs milliers de saccades. Ce que semble confirmer *Carpenter (1995)* qui pour chaque condition a laissé plusieurs heures de pratique aux sujets. Il a observé un changement progressif dans les TR et il a recueilli les données expérimentales uniquement après cet entraînement. Deuxièmement, lorsque *Carpenter (2000)* a étudié l'effet de l'urgence sur le TR, il a remarqué qu'il fallait au minimum 500 essais d'entraînement dans la même condition pour que les différences de latence deviennent apparentes. Troisièmement, *Carpenter (1995)* a enregistré ces données sur seulement deux sujets, ce n'est pas suffisant pour avoir des résultats robustes. Il est possible que les sujets choisis aient un comportement spécifique comme ça a été le cas pour le sujet 2 dans mon expérience. En second lieu, au vu de la dispersion du nombre d'erreurs et de TR entre les sujets, peut-être que leur but n'était pas les mêmes. Je ne leur ai pas spécifié s'il devait être rapide ou précis. Dans l'étude de *Carpenter (2000)*, il trouve des différences significatives du TR selon si les saccades ont été effectuées dans l'une ou l'autre des deux conditions, car ces saccades modifient la valeur de seuil ST.

## 5 Conclusion

Une analyse des comparaisons des échantillons gauche et droite dans la condition à 50 % tend vers une signification trop faible pour affirmer que les 2 échantillons appartiennent à la même population. À partir d'une étude superficielle, le pourcentage moyen d'erreur semble diminuer avec l'augmentation des priors. Aucune tendance ne peut être observée pour les saccades précoces, cependant leur pourcentage est inférieur à 5 %. Les saccades tardives semblent augmenter au fur et à mesure de l'expérience.

Selon mes résultats, le TR ne semble pas suivre une loi récinormale comme suggéré dans la littérature scientifique (Carpenter & Williams, 1995). Je n'ai pas observé d'évolution de la valeur de  $S_0$  selon les priors et par conséquent, je n'ai pas retrouvé les résultats de *Carpenter (1995)* concernant la corrélation inverse du TR et des priors.

Les raisons précises de l'absence de résultats de mon expérience qui corroboraient la théorie du modèle LATER dans la littérature ne peuvent pas être affirmées avec certitude. Mes hypothèses les plus pertinentes sont : Le filtrage des saccades précoces et tardive n'était pas assez précis, l'absence d'entraînement pour chacune des conditions et fixé un seuil ST en indiquant aux sujets s'ils doivent effectuer l'expérience sous une condition de précision ou d'urgence.

## Bibliographie

- Akman, O. (2003). *Analysis of a nonlinear dynamics model of the saccadic system*.
- Asadi Eydivand, M., Darlot, C., Ebadzadeh, M., Jean, F., & Ouanezar, S. (2012). *Modélisation des voies de la commande saccadique*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00679950>
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Lachaine, R., & Faucher, J. (2012). *Campbell biologie* (9e éd). Pearson.
- Carpenter, R. H. S. (1981). Oculomotor Procrastination. In *Eye Movements*. Routledge.
- Carpenter, R. H. S. (1999). A neural mechanism that randomises behaviour. *Journal of Consciousness Studies*, 6(1), 13-13.
- Carpenter, R. H. S. (2012). Analysing the Detail of Saccadic Reaction Time Distributions. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 32, 49-63. [https://doi.org/10.1016/S0208-5216\(12\)70036-0](https://doi.org/10.1016/S0208-5216(12)70036-0)
- Carpenter, R. H. S., & Williams, M. L. (1995). Neural computation of log likelihood in control of saccadic eye movements. *Nature*, 377(6544), 59-62. <https://doi.org/10.1038/377059a0>
- de Brouwer, S., Missal, M., Barnes, G., & Lefèvre, P. (2002). Quantitative Analysis of Catch-Up Saccades During Sustained Pursuit. *Journal of Neurophysiology*, 87(4), 1772-1780. <https://doi.org/10.1152/jn.00621.2001>
- Deeb, S. (2005). The molecular basis of variation in human color vision : Variation in human color vision. *Clinical Genetics*, 67(5), 369-377. <https://doi.org/10.1111/j.1399-0004.2004.00343.x>
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (2003). Delayed Saccades, but Not Delayed Manual Aiming Movements, Require Visual Attention Shifts. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1004(1), 289-296. <https://doi.org/10.1196/annals.1303.026>



- Ehrenstein, W. H., Arnold-Schulz-Gahmen, B. E., & Jaschinski, W. (2005). Eye preference within the context of binocular functions. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 243(9), 926-932. <https://doi.org/10.1007/s00417-005-1128-7>
- Evans, J. St. B. T., & Stanovich, K. E. (2013). Dual-Process Theories of Higher Cognition : Advancing the Debate. *Perspectives on Psychological Science*, 8(3), 223-241. <https://doi.org/10.1177/1745691612460685>
- Gold, J. I., & Shadlen, M. N. (2007). The Neural Basis of Decision Making. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 535-574. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.29.051605.113038>
- Good, I. J. (1952). Rational Decisions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 14(1), 107-114.
- Halliday, J., & Carpenter, R. H. S. (2010). The Effect of Cognitive Distraction on Saccadic Latency. *Perception*, 39(1), 41-50. <https://doi.org/10.1068/p6547>
- Henderson, J., & Ferreira, F. (2013). *The Interface of Language, Vision, and Action : Eye Movements and the Visual World*. Psychology Press.
- 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>
- Isa, T., Marquez-Legorreta, E., Grillner, S., & Scott, E. K. (2021). The tectum/superior colliculus as the vertebrate solution for spatial sensory integration and action. *Current Biology*, 31(11), R741-R762. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.04.001>
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow* (p. 499). Farrar, Straus and Giroux.
- Kandel E.R., & Koester J.D., & Mack S.H., & Siegelbaum S.A. (s. d.). *Principles of Neural Science*, 6e.

- Kaplan, E. (2003). The M, P and K pathways in the Primate Visual System. In *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* (Vol. 46, p. 481-494).
- Larousse, É. (s. d.). *champ visuel*—*LAROUSSE*. Consulté 26 mai 2022, à l'adresse [https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/champ\\_visuel/11874](https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/champ_visuel/11874)
- LE CERVEAU À TOUS LES NIVEAUX!* (s. d.). Consulté 26 mai 2022, à l'adresse [https://le-cerveau.mcgill.ca/flash/i/i\\_02/i\\_02\\_cl/i\\_02\\_cl\\_vis/i\\_02\\_cl\\_vis.html](https://le-cerveau.mcgill.ca/flash/i/i_02/i_02_cl/i_02_cl_vis/i_02_cl_vis.html)
- Leary, D., Adviser, D., & Miyagi, M. (2010). *Circadian proteome changes in photoreceptor outer segments*.
- Lithfous, S., Després, O., & Dufour, A. (2018). Chapitre 4—Les déficits d'attention spatiale. In S. Lithfous, O. Després, & A. Dufour (Éds.), *Le Vieillissement Neurodegeneratif: Methodes de Diagnostic Differentiel* (p. 61-80). Elsevier Masson.  
<https://doi.org/10.1016/B978-2-294-75561-3.00004-3>
- L'œil – Blue Cone Monochromacy*. (s. d.). Consulté 26 mai 2022, à l'adresse <https://www.blueconemonochromacy.org/fr/how-the-eye-functions/>
- Noorani, I., & Carpenter, R. H. S. (2016). The LATER model of reaction time and decision. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 64, 229-251. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiorev.2016.02.018>
- Panouillères, M. (2011). *Contrôle du regard : Mécanismes et substrats neuronaux de l'adaptation des mouvements oculaires saccadiques chez l'homme* [Université Claude Bernard]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00623781>
- Papaioannou, A. G., Kalantzi, E., Papageorgiou, C. C., Korombili, K., Bokou, A., Pehlivani-dis, A., Papageorgiou, C. C., & Papaioannou, G. (2021). Complexity analysis of the brain activity in Autism Spectrum Disorder (ASD) and Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) due to cognitive loads/demands induced by Aristotle's type of

- sylllogism/reasoning. A Power Spectral Density and multiscale entropy (MSE) analysis. *Heliyon*, 7(9), e07984. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07984>
- Pignat, J. M. (2005). *Etude de la perception visuelle du mouvement et de la couleur par IRMf* [University of Geneva]. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:385>
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2007). Research on Attention Networks as a Model for the Integration of Psychological Science. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085516>
- Reddi, B. A., & Carpenter, R. H. S. (2000). The influence of urgency on decision time. *Nature Neuroscience*, 3(8), 827-830. <https://doi.org/10.1038/77739>
- Rensink, R. A. (2000). The Dynamic Representation of Scenes. *Visual Cognition*, 7(1-3), 17-42. <https://doi.org/10.1080/135062800394667>
- Rensink, R. A., O'Regan, J. K., & Clark, J. J. (1997). To See or not to See : The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. *Psychological Science*, 8(5), 368-373. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00427.x>
- Silva, M. P. da. (2010). *Modèle computationnel d'attention pour la vision adaptative* [Phdthesis, Université de La Rochelle]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00573844>
- Tanaka, M., & Tachibana, M. (2013). Independent control of reciprocal and lateral inhibition at the axon terminal of retinal bipolar cells. *The Journal of Physiology*, 591(16), 3833-3851. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2013.253179>
- Team, T. M. (2017). *An Analysis of William James's The Principles of Psychology*. Macat Library. <https://doi.org/10.4324/9781912282494>

*Visual field* : *MedlinePlus Medical Encyclopedia*. (s. d.). Consulté 21 avril 2022, à l'adresse

<https://medlineplus.gov/ency/article/003879.htm>

Vlaev, I., Chater, N., Stewart, N., & Brown, G. D. A. (2011). Does the brain calculate value?

*Trends in Cognitive Sciences*, 15(11), 546-554.

<https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.09.008>

Wurtz, R., & Albano, J. E. (1980). Visual-motor function of the primate superior colliculus.

*Annual review of neuroscience*. [https://doi.org/10.1146/AN-](https://doi.org/10.1146/AN-NUREV.NE.03.030180.001201)

NUREV.NE.03.030180.001201

## Annexe

### Annexe 1

Tableau récapitulatif de la normalité des distributions par condition pour tous les sujets

Sujet	1					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk						
Distribution normal	non	non	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	2					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,783	0,003	0,13	0,1	0,63	0,43
Distribution normal	oui	non	oui	oui	oui	oui
H0	ACCEPTÉE					

Sujet	3					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,02	0,001	0,001	0,02	0,001	0,001
Distribution normal	Non	non	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	4					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,19	0,269	0,07	0,02	0,001	0,108
Distribution normal	oui	oui	oui	Non	non	oui
H0	Rejeter					

Sujet	5					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,19	0,143	0,001	0,08	0,001	0,001
Distribution normal	oui	oui	non	oui	non	non
H0	REJETER					

Sujet	6					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,279	0,03	0,04	0,001	0,001
Distribution normal	non	oui	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	7					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk		0,64	0,001	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	non	oui	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	8					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,001	0,001	0,16	0,001	0,001
Distribution normal	non	non	non	oui	non	non
H0	REJETER					

Sujet	9					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,745	0,915	0,859	0,001	0,02
Distribution normal	non	oui	oui	oui	non	non
H0	REJETER					

Sujet	10					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk						
Distribution normal	non	non	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	11					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,893	0,02	0,088	0,731	0,309	0,001
Distribution normal	oui	non	oui	oui	oui	non
H0	REJETER					

Sujet	17					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,001	0,11	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	non	non	oui	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	18					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	non	non	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	19					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	non	non	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	20					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	non	non	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	21					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,56	0,06	0,001	0,15	0,001	0,001
Distribution normal	oui	oui	non	oui	non	non
H0	REJETER					

Sujet	22					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,56	0,06	0,001	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	oui	oui	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	23					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,125	0,18	0,01	0,961	0,001	0,001
Distribution normal	oui	oui	oui	oui	non	non
H0	REJETER					

Sujet	24					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,125	0,18	0,001	0,001	0,001	0,001
Distribution normal	oui	oui	non	non	non	non
H0	REJETER					

Sujet	25					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
Signification Shapiro-Wilk	0,423	0,001	0,001	0,535	0,001	0,001
Distribution normal	oui	non	non	oui	non	non
H0	REJETER					

*Note.* Le seuil de signification pour le test Shapiro-Wilk est de 0,05.

## Annexe 2

*Tableau récapitulatif du pourcentage d'erreur, de saccades précoces et de saccades tardives par condition pour tous les sujets*

Sujet	1					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% S_précoces (< 200 ms)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% S tardives (> 600 ms)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Sujet	2					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	2,22	2,67	0,67	1,33	3,00	2,50
% S_précoces (< 200 ms)	0,10	0,03	0,09	0,02	0,09	0,11
% S tardives (> 600 ms)	0,00	18,67	2,67	11,33	1,33	9,44

Sujet	3					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	5,56	4,00	0,00	0,00	0,00	0,28
% S_précoces (< 200 ms)	0,06	0,03	0,00	0,00	0,02	0,02
% S tardives (> 600 ms)	22,22	12,67	17,33	7,33	13,67	8,33

Sujet	4					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	3,33	6,00	0,00	0,00	1,33	1,67
% S_précoces (< 200 ms)	0,06	0,01	4,67	4,00	8,33	5,83
% S tardives (> 600 ms)	6,67	4,67	4,67	2,00	3,67	3,06

Sujet	5					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	5,56	4,67	2,00	2,67	2,00	1,39
% S_précoces (< 200 ms)	2,22	4,67	3,33	4,00	4,67	6,11
% S tardives (> 600 ms)	21,11	3,33	15,33	1,33	12,67	4,72

Sujet	6					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	3,33	0,00	0,00	0,67	1,00	0,00
% S_précoces (< 200 ms)	3,33	0,67	2,67	0,67	1,00	2,78
% S tardives (> 600 ms)	6,67	1,33	0,00	0,67	4,33	10,56

Sujet	7					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	7,78	0,00	0,67	1,33	1,33	0,56
% S_précoces (< 200 ms)	1,11	0,00	1,33	2,67	1,33	1,67
% S tardives (> 600 ms)	22,22	12,67	1,33	0,00	10,00	15,83



Sujet	8					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00
% S_précoces (< 200 ms)	1,11	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00
% S tardives (> 600 ms)	2,22	1,33	3,33	4,00	3,33	1,67

Sujet	9					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	1,11	2,00	0,00	0,00	0,67	0,00
% S_précoces (< 200 ms)	1,11	4,00	0,67	0,00	2,67	0,00
% S tardives (> 600 ms)	6,67	2,00	2,00	1,33	4,00	3,33

Sujet	10					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% S_précoces (< 200 ms)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% S tardives (> 600 ms)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Sujet	11					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	2,22	0,67	0,00	0,00	0,00	1,11
% S_précoces (< 200 ms)	4,44	1,33	0,00	1,33	0,67	3,89
% S tardives (> 600 ms)	1,11	4,00	6,67	0,67	3,00	5,00

Sujet	12					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	12,22	5,33	0,67	0,67	2,00	0,56
% S_précoces (< 200 ms)	11,11	6,67	4,00	3,33	7,00	12,22
% S tardives (> 600 ms)	7,78	6,00	0,67	2,00	4,00	5,28

Sujet	13					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	2,22	1,33	1,33	0,67	0,67	0,56
% S_précoces (< 200 ms)	3,33	1,33	2,00	2,67	0,33	0,56
% S tardives (> 600 ms)	16,67	5,33	17,33	25,33	23,33	24,17

Sujet	14					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	1,11	0,67	0,00	1,33	0,00	0,28
% S_précoces (< 200 ms)	1,11	0,67	3,33	2,00	1,67	2,78
% S tardives (> 600 ms)	6,67	2,00	2,00	1,33	4,00	2,22

Sujet	15					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	3,33	0,67	4,67	3,33	0,67	0,28
% S_précoces (< 200 ms)	1,11	0,67	10,67	5,33	6,33	3,89
% S tardives (> 600 ms)	12,22	10,00	6,00	6,00	9,67	8,89

Sujet	16					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	4,44	0,67	0,67	0,67	0,00	0,28
% S_précoces (< 200 ms)	4,44	1,33	0,67	0,67	0,67	2,78
% S tardives (> 600 ms)	10,00	17,33	6,67	10,00	10,00	8,33

Sujet	17					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	7,78	6,67	2,00	3,33	2,33	1,67
% S_précoces (< 200 ms)	7,78	6,00	10,67	6,67	9,33	8,06
% S tardives (> 600 ms)	15,56	24,00	8,67	10,00	20,00	18,61

Sujet	18					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	2,22	5,33	4,00	0,67	4,67	3,89
% S_précoces (< 200 ms)	5,56	8,67	6,00	6,00	9,67	7,50
% S tardives (> 600 ms)	30,00	9,33	9,33	2,00	12,67	7,22

Sujet	19					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	11,11	2,67	6,00	0,67	1,33	1,67
% S_précoces (< 200 ms)	12,22	3,33	19,33	5,33	6,33	10,00
% S tardives (> 600 ms)	5,56	10,00	2,67	5,33	4,67	6,67

Sujet	20					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	6,67	6,00	0,00	3,33	2,67	0,28
% S_précoces (< 200 ms)	2,22	8,00	1,33	2,67	2,33	3,89
% S tardives (> 600 ms)	14,44	37,33	22,67	8,67	11,67	42,22

Sujet	21					
Condition	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
% d'erreur	3,33	2,00	2,67	2,67	2,67	0,28
% S_précoces (< 200 ms)	2,22	3,33	5,33	5,33	2,33	3,89
% S tardives (> 600 ms)	7,78	2,00	0,00	0,00	11,67	42,22

<b>Sujet</b>	<b>22</b>					
<b>Condition</b>	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
<b>% d'erreur</b>	3,33	2,00	1,33	0,67	0,00	0,56
<b>% S_ précoces (&lt; 200 ms)</b>	2,22	3,33	2,00	3,33	2,33	3,33
<b>% S tardives (&gt; 600 ms)</b>	7,78	2,00	1,33	6,67	12,33	5,83

<b>Sujet</b>	<b>23</b>					
<b>Condition</b>	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
<b>% d'erreur</b>	1,11	2,67	1,33	0,00	0,00	0,56
<b>% S_ précoces (&lt; 200 ms)</b>	1,11	2,67	2,00	0,00	2,33	3,33
<b>% S tardives (&gt; 600 ms)</b>	13,33	3,33	0,67	0,67	12,33	5,83

<b>Sujet</b>	<b>24</b>					
<b>Condition</b>	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
<b>% d'erreur</b>	1,11	2,67	0,67	2,00	0,00	0,56
<b>% S_ précoces (&lt; 200 ms)</b>	1,11	2,67	3,33	2,67	6,33	5,28
<b>% S tardives (&gt; 600 ms)</b>	13,33	3,33	1,33	1,33	5,00	4,17

<b>Sujet</b>	<b>25</b>					
<b>Condition</b>	20 %	33 %	50 % Gauche	50 % Droite	66 %	80 %
<b>% d'erreur</b>	3,33	1,33	1,33	1,33	1,33	0,56
<b>% S_ précoces (&lt; 200 ms)</b>	2,22	1,33	4,00	2,00	1,67	4,44
<b>% S tardives (&gt; 600 ms)</b>	7,78	32,67	12,67	2,00	11,00	17,22

### Annexe 3

Tableau récapitulatif de la valeur moyenne de  $\theta$  par condition pour tous les sujets

Sujet		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
2	50 % G1,2,3D4,5,6	0,08	0,12	0,14	0,11	0,13	0,18
	66 %	0,11	0,12	0,06	0,14	0,09	0,08
	80 %	0,11	0,12	0,09	0,09	0,10	0,09
3	50 % G1,2,3D4,5,6	0,17	0,20	0,16	0,16	0,18	0,19
	66 %	0,17	0,17	0,14	0,16	0,15	0,17
	80 %	0,14	0,18	0,16	0,17	0,15	0,15
4	50 % G1,2,3D4,5,6	0,11	0,11	0,11	0,13	0,12	0,11
	66 %	0,09	0,10	0,10	0,11	0,10	0,12
	80 %	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
5	50 % G1,2,3D4,5,6	0,18	0,18	0,20	0,11	0,11	0,13
	66 %	0,16	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15
	80 %	0,11	0,13	0,12	0,12	0,11	0,12
6	50 % G1,2,3D4,5,6	0,10	0,10	0,11	0,13	0,13	0,15
	66 %	0,14	0,15	0,14	0,16	0,14	0,16
	80 %	0,12	0,20	0,13	0,13	0,13	0,13
7	50 % G1,2,3D4,5,6	0,11	0,13	0,13	0,12	0,13	0,13
	66 %	0,13	0,11	0,16	0,18	0,13	0,18
	80 %	0,12	0,14	0,12	0,14	0,10	0,12
8	50 % G1,2,3D4,5,6	0,11	0,11	0,11	0,13	0,12	0,11
	66 %	0,08	0,13	0,10	0,11	0,13	0,12
	80 %	0,11	0,12	0,10	0,11	0,13	0,12
9	50 % G1,2,3D4,5,6	0,13	0,14	0,13	0,13	0,13	0,14
	66 %	0,15	0,14	0,15	0,13	0,14	0,15
	80 %	0,13	0,13	0,12	0,11	0,13	0,13
10	50 % G1,2,3D4,5,6	0,12	0,13	0,15	0,11	0,13	0,11
	66 %	Données inexistantes					
	80 %						
11	50 % G1,2,3D4,5,6	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12
	66 %	0,13	0,14	0,13	0,11	0,09	0,13
	80 %	0,10	0,17	0,11	0,21	0,13	0,13
12	50 % G1,2,3D4,5,6	0,14	0,11	0,12	0,14	0,13	0,14
	66 %	0,12	0,13	0,09	0,16	0,12	0,11
	80 %	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12
13	50 % G1,2,3D4,5,6	0,21	0,19	0,21	0,21	0,19	
	66 %	0,14	0,14	0,17	0,25	0,21	0,19
	80 %	0,23	0,20	0,22	0,23	0,21	0,23
14	50 % G1,2,3D4,5,6	0,13	0,13	0,13	0,15	0,14	0,13
	66 %	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14
	80 %	0,09	0,17	0,10	0,19	0,13	0,15

15	50 % G1,2,3D4,5,6	0,13	0,12	0,13	0,16	0,13	0,14
	66 %	0,15	0,12	0,15	0,14	0,11	0,20
	80 %	0,17	0,14	0,13	0,15	0,12	0,12
16	50 % G1,2,3D4,5,6	0,14	0,16	0,17	0,14	0,18	0,16
	66 %	0,17	0,17	0,19	0,15	0,16	0,13
	80 %	0,16	0,15	0,10	0,18	0,17	0,19
17	50 % G1,2,3D4,5,6	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
	66 %	0,14	0,15	0,12	0,15	0,14	
	80 %	0,14	0,17	0,17	0,13	0,17	0,14
18	50 % G1,2,3D4,5,6	0,16	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17
	66 %	0,17	0,16	0,14	0,16	0,15	
	80 %	0,19	0,20	0,19	0,18	0,15	0,23
19	50 % G1,2,3D4,5,6	0,15	0,14	0,13	0,14	0,13	0,14
	66 %	0,14	0,15	0,14	0,15	0,14	0,12
	80 %	0,15	0,16	0,15	0,15	0,13	0,13
20	50 % G1,2,3D4,5,6	0,21	0,19	0,21	0,18	0,18	0,17
	66 %	0,14	0,19	0,18	0,12	0,20	
	80 %	0,22	0,21	0,20			
21	50 % G1,2,3D4,5,6	0,11	0,15	0,12	0,10	0,11	0,11
	66 %	0,16	0,16	0,15	0,15	0,17	0,19
	80 %	0,09	0,17	0,13	0,14	0,14	0,13
22	50 % G1,2,3D4,5,6	0,16	0,15	0,17	0,16	0,17	0,17
	66 %	0,15	0,17	0,13	0,20	0,16	0,15
	80 %	0,14	0,22	0,18	0,21	0,20	0,18
23	50 % G1,2,3D4,5,6	0,12	0,13	0,13	0,11	0,11	0,13
	66 %	0,12	0,13	0,14	0,15	0,14	0,16
	80 %	0,10	0,18	0,15	0,15	0,15	0,13
24	50 % G1,2,3D4,5,6	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12
	66 %	0,11	0,13	0,11	0,12	0,11	0,12
	80 %	0,10	0,12	0,08	0,18	0,12	0,11
25	50 % G1,2,3D4,5,6	0,16	0,16	0,18	0,15	0,15	0,16
	66 %	0,16	0,17	0,18	0,18	0,15	0,17
	80 %	0,16	0,18	0,17	0,18	0,16	0,14