
Analyse des saccades oculaires vers une cible visuelle unique

Auteurs :

M. Alexis MARION

M. Adrien POTIER

M. Arnaud VENET

Tutrice :

M^{me} Muriel ROCHE

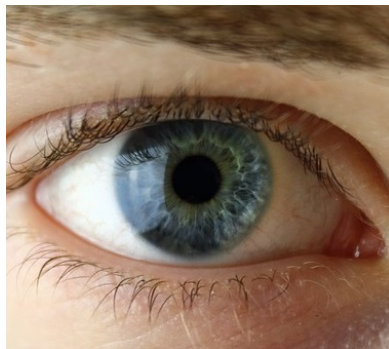


FIGURE 1 – Oeil [Pixel]

19 mai 2017

Table des matières

Introduction	2
1 Etudes des mouvements oculaires	3
1.1 Littérature	3
1.2 Rencontre avec Françoise Vitu	4
2 Exploitation des données	5
2.1 Extraction	5
2.2 Visualisation	5
3 Recherche d'un modèle de comportement	7
3.1 Exploitation des résultats	7
3.2 Perspective : application des théories des systèmes asservis	8
Conclusion	10
Annexe	11

Introduction et description du projet

L'étude des saccades oculaires a débuté il y a plus d'un siècle. L'un des premiers chercheurs à l'avoir observé est Emile Javal dans des articles publiés en 1878 et 1879[Wikipedia 2017]. Une saccade oculaire est un mouvement brusque de l'oeil lui permettant de passer d'une cible à une autre. La saccade peut généralement être caractérisée par plusieurs paramètres :

- durée : temps allant du départ de la saccade jusqu'à la fixation.
- amplitude/excentricité : angle parcouru par l'oeil
- latence : temps entre la désignation de la cible et le début du mouvement.
- overshoot/undershoot : erreur entre la cible à viser et la position de l'oeil une fois la fixation faite.
- dynamic overshoot : dépassement observé avant la fixation finale de l'oeil.

Mme Françoise Vitu, chercheuse en science cognitive au CNRS, poursuit actuellement des recherches sur les saccades oculaires. L'objectif de ce projet est d'apporter un regard d'ingénieur en étudiant les données recueillies sur des expériences, et de rechercher des corrélations pour expliquer, d'un oeil nouveau, le fonctionnement de la vue.

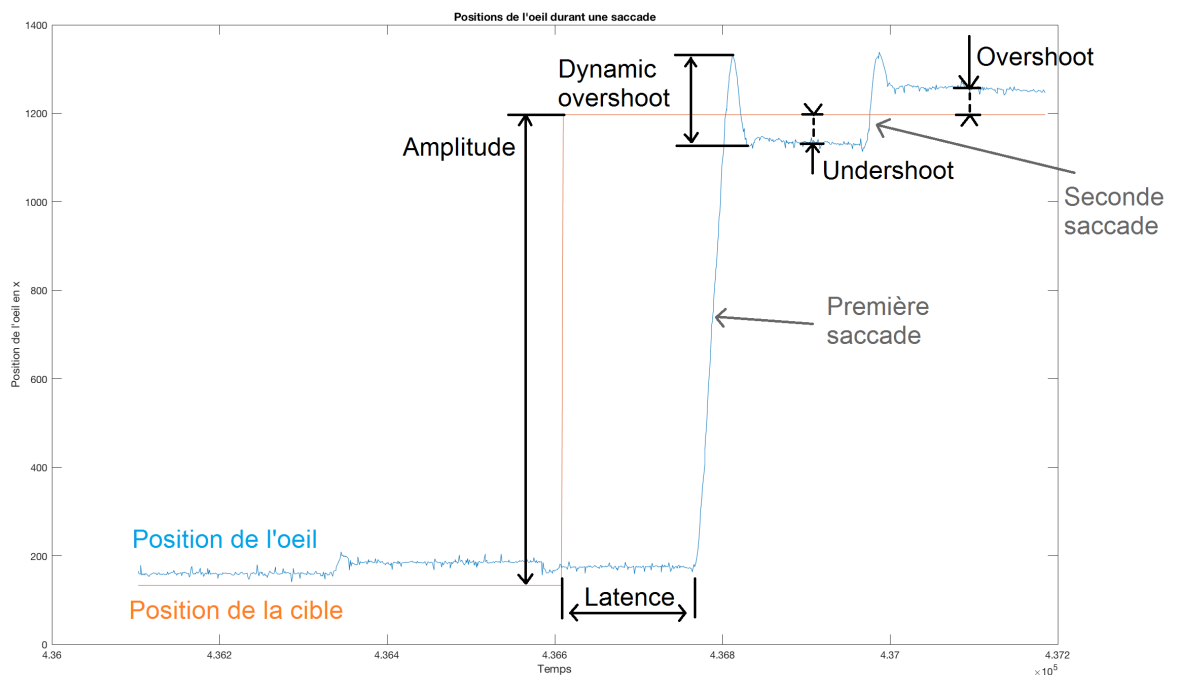


FIGURE 2 – Position de l'oeil et de la cible en x en fonction du temps

1 Etudes des mouvements oculaires

1.1 Littérature

Afin d'acquérir les connaissances nécessaires dans le domaine, nous avons dû, avant de commencer le projet, lire différents articles traitant du sujet. Notre bibliographie était constituée de 2 chapitres d'un livre de Kenneth Holmqvist, d'un article de Heiner Deubel et Bruce Bridgeman et du dernier article de Françoise Vitu.

- [Holmqvist 2011a] : Le chapitre 2 de ce livre est consacré à une présentation détaillée du système oculo-moteur, aux hypothèses faites pour expliquer certains fonctionnements de la vision humaine, et une attention particulière est portée à l'étude des saccades. Les questions d'apprentissage et d'anticipation sont ici ignorées.
- [Holmqvist 2011b] : Le chapitre 5 de cet ouvrage est consacré à l'étude des données obtenues par la mesure de la position des yeux. Ainsi on y parle des différentes méthodes permettant par exemple de calculer la vitesse ou l'accélération à partir de la position des yeux dans le temps. On y apprend également à distinguer certains phénomènes comme les saccades, les fixations et les glissements.
- [Heiner Deubel 1994] : Cet article décrit le fonctionnement de deux appareils pour tracer le mouvement des yeux lorsqu'il suit une cible. Le premier est le Search Coil (1963), il fonctionne grâce à des bobines qui induisent un petit courant dans une autre bobine placée sur une lentille posée sur l'oeil. Le deuxième est le Purkinje Image tracker, qui contrôle la position de l'oeil grâce à la réflexion d'un laser infrarouge sur l'oeil. L'article rapporte certaines corrélations (encore supposées) entre le dynamic overshoot ou l'overshoot et d'autres paramètres, comme la taille de la saccade, l'accommodation (c'est à dire la distance entre le sujet et la cible), et aussi l'âge du sujet.
- [Françoise Vitu 2017] : Cet article aborde la théorie selon laquelle les phénomènes observés dans le déplacement des yeux ne sont pas dûs à un ajustement stratégique du gain en aval du colliculus supérieur (la partie du cerveau vers laquelle sont envoyés les signaux reçus sur la rétine), mais bien à un ajustement ayant lieu à l'intérieur du colliculus, voire avant. Pour vérifier cette hypothèse un grand nombre d'expériences a été réalisé où l'on a mesuré la position des yeux lors de mouvements oculaires. La but est de mesurer les différents paramètres et de vérifier si on observe bien les phénomènes prédits par la nouvelle théorie. En particulier il est question de tester la réaction de l'oeil lors de mouvements de grandes excentricités pour vérifier si les effets de magnification qui devraient avoir lieu dans le colliculus se retrouvent dans la réaction de l'oeil.

1.2 Rencontre avec Françoise Vitu

Le 28 mars nous avons eu avec Muriel Roche un entretien avec Françoise Vitu qui avait pour but de fournir plus de détails sur le champ de recherche et de nous fournir des données sur lesquelles travailler. Lors de cet entretien nous avons beaucoup parlé de la représentation de la vue dans le colliculus supérieur. La piste de recherche de Françoise Vitu est que les phénomènes d'overshoot sont liés à la représentation de l'image dans le colliculus. La topologie de la représentation de cette image créerait une distorsion (magnification) sur les bords, ce qui expliquerait que les overshoots sont plus présents lorsque l'oeil réalise une saccade de grande amplitude. Notre rôle est donc de trouver des corrélations entre ces phénomènes d'overshoot et les autres paramètres et phénomènes observés. Enfin à l'issue de ce rendez-vous, nous avons récupéré un ensemble de données constituées de 90 séances de 8 minutes d'expériences environ, contenant chacune une centaine de saccades, récupérées sur un individu unique.

Une seconde rencontre a eu lieu le 17 mai afin de faire un point sur l'avancement du projet et de présenter nos résultats.

2 Exploitation des données

2.1 Extraction

Une fois les données récupérées, il faut les traiter avant de pouvoir les analyser. Initialement, elles étaient dans un fichier texte, et on a choisit de tout mettre dans une base de donnée `.SQLITE`. Ce choix s'est fait naturellement étant donné la taille des données (1/2 Go de fichier texte), surtout que, par la suite, il est très pratique de récupérer les données que l'on souhaite en important la base de données dans Matlab. Avant d'importer les fichiers textes dans la base de données, nous les avons mises sous un format plus adapté pour l'importation (`.csv`) à l'aide d'un programme python et de la bibliothèque `re` étudiée en cours de Recherche et Extraction de l'Information Numériques (REIN). Une fois ceci fait, il faut importer les fichiers `.csv` dans la base de donnée. Cette tâche est fastidieuse et rébarbative vu le nombre de fichier à importer (une centaine). Pour automatiser ceci, nous avons écrit un programme SQL qui importe à notre place les fichiers `.csv`. Une fois ceci fait, on a pu commencer à analyser ces données grâce à Matlab.

2.2 Visualisation

Maintenant que les données sont bien organisées dans une base de données `.SQLITE`, il devient bien plus facile de récupérer exactement ce que l'on veut pour les afficher à l'écran sur un graphique. Les saccades récupérées surviennent soit dans le plan horizontal, vertical, ou oblique (45deg). Nous ne traiterons que le cas horizontal, car c'est lui qui a été le plus étudié jusqu'à aujourd'hui. Aussi, les saccades réalisées par le sujet sont de 16 amplitudes (ou excentricités) différentes (allant de 1 à 16deg). Ce qui va être intéressant de tracer, ce sont les relations des différents paramètres caractérisant une saccade, en fonction de son excentricité. C'est à dire les quatre principaux définis en introduction : l'overshoot, le dynamic overshoot, la latence, et la durée. Mais d'abord intéressons-nous à une seule saccade.

Expliquons brièvement comment fonctionne le programme Matlab. Tout d'abord, on se connecte à la base de données depuis Matlab, puis on fait une requête SQL pour sélectionner les données qui nous intéressent, relatives à une ou plusieurs saccades. L'organisation de la base de données fait que l'on peut éviter de sélectionner les données quand le sujet cligne les yeux, où que le tracker n'arrive pas à se représenter la position de l'oeil. Pour afficher une saccade, il faut trois informations. La position fixée par l'oeil sur l'écran (en pixel) selon x , selon y , et le temps. Il faut en plus de cela les coordonnées de la cible à fixer. On peut ainsi tracer l'allure de la position de l'oeil durant la saccade selon x ou y en fonction du temps, ou la représentation spatiale x en fonction de y .

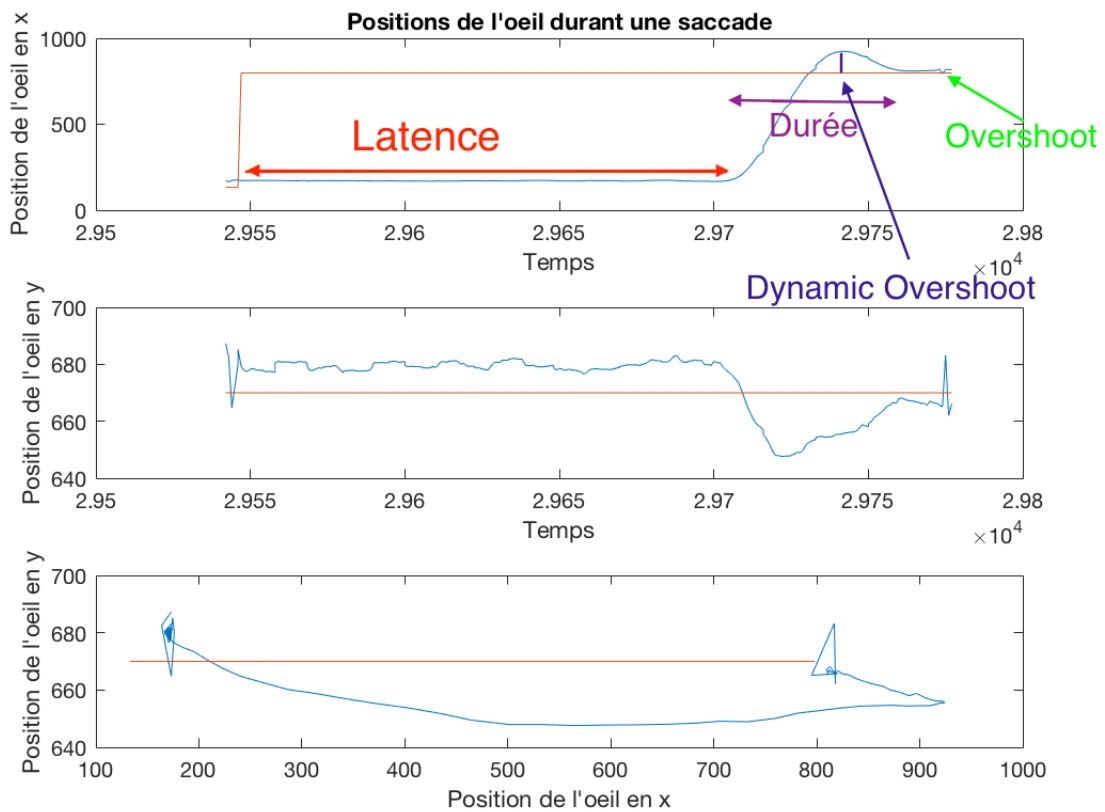


FIGURE 3 – Positions successives de l’oeil pendant une saccade

Sur la Figure 1 les mouvements de l’oeil sont représentés par la courbe bleue, la courbe orange représente la consigne à fixer.

Une fois que l’on a tracé ces courbes, nous rentrons dans la partie la plus délicate. Il va falloir essayer de calculer au mieux les paramètres énoncés précédemment. Pour cela il faut détecter quand l’oeil entre en saccade, atteint son point le plus excentré, entre en fixation... Ceci n’est pas tâche facile, car il faut pourvoir trier et éliminer les données erronées (le sujet regarde ailleurs sans faire attention), et il faut aussi prendre en compte les phénomènes de double saccade.

3 Recherche d'un modèle de comportement

3.1 Exploitation des résultats

Il convient maintenant d'exploiter les données recueillies. Pour cela nous avons décidé d'exploiter en priorité les données issues des expériences selon l'axe horizontal. Avant de tirer des conclusions, il convient de vérifier que notre exploitation des données est en accord avec ce qui est déjà connu du monde scientifique, à savoir ici :

- la latence en fonction de l'excentricité
- l'erreur (undershoot/overshoot) en fonction de l'excentricité
- la durée de la saccade en fonction de l'excentricité.

Voilà l'allure des courbes que nous espérons obtenir, d'une part pour vérifier que notre exploitation est cohérente, d'autre part pour valider les hypothèses de Françoise Vitu :

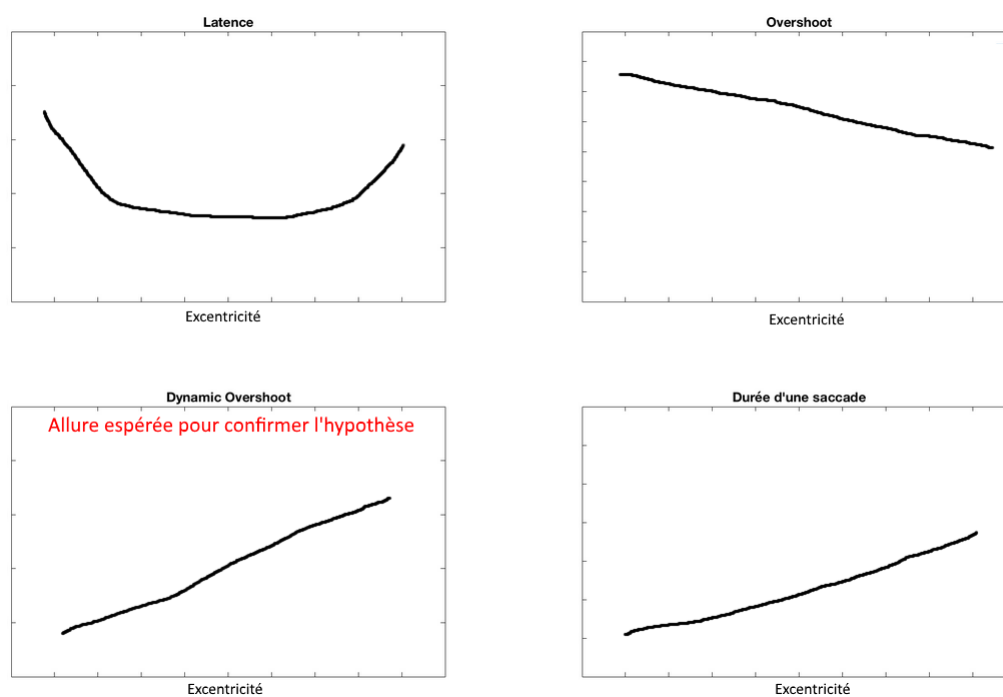


FIGURE 4 – Courbes attendues et espérées

Et voici les courbes que nous obtenons, après compilation d'un millier de saccade horizontales (résultats bruts en annexe) :

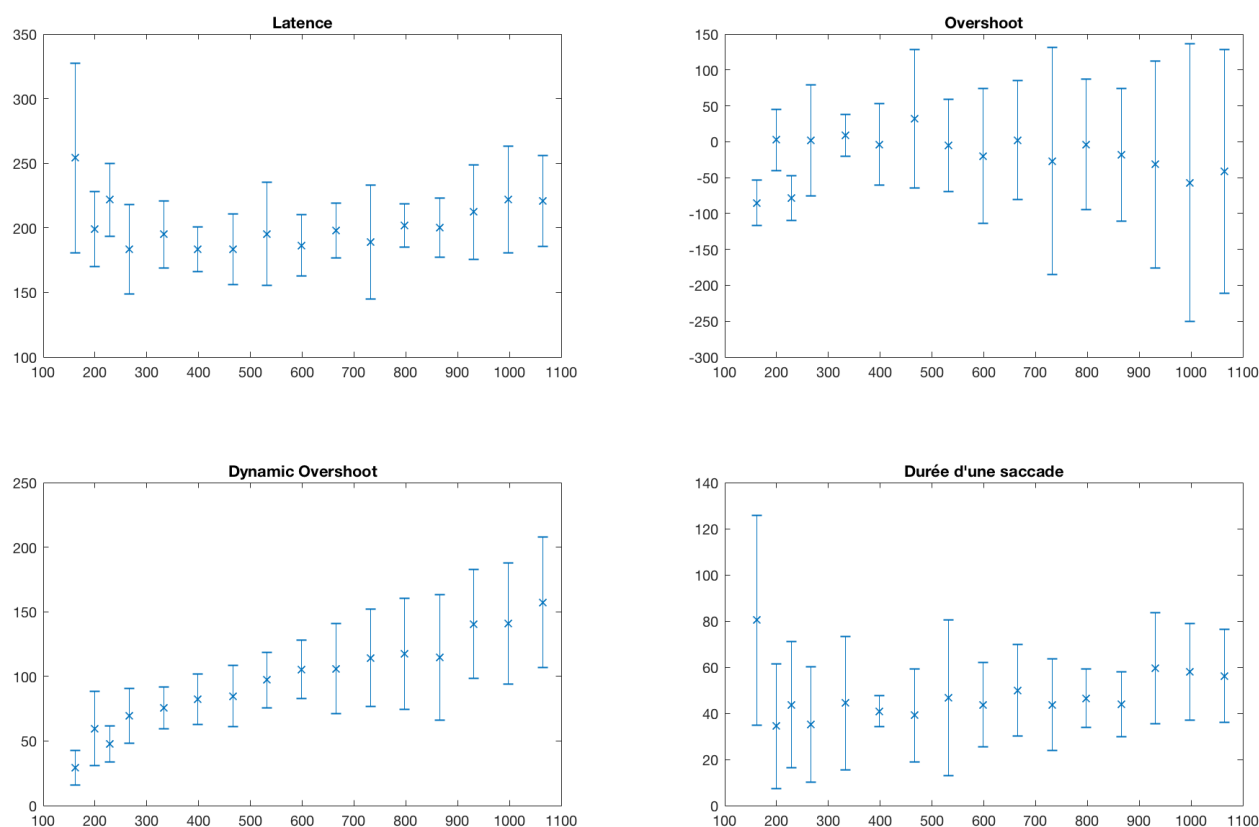


FIGURE 5 – Moyennes des grandeurs considérées sur les 100 expériences

On peut remarquer que nos résultats ont la même allure que les résultats que nous a décrit Françoise Vitu, ce qui est très encourageant et nous incite à penser que nos algorithmes de sélection des grandeurs voulues sont bien réglés et renvoient les bonnes grandeurs. Une fois cela vérifié, on peut se permettre de regarder le reste des données. On observe alors que l'allure du Dynamic Overshoot en fonction de l'excentricité est celle qu'espère obtenir Françoise Vitu pour confirmer ses hypothèses comportementales. On ne peut pour l'instant rien conclure, mais le résultat semble encourageant et nous espérons qu'elle pourra à partir de nos travaux tirer des résultats pour approfondir ses recherches.

3.2 Perspective : application des théories des systèmes asservis

En traçant à de multiples reprises la position de l'oeil lors de saccades nous avons rapidement retrouvé l'aspect familier des réponses obtenues dans des systèmes asservis. Et en effet, en dehors des données observées, il est assez naturel de considérer le mécanisme de l'orientation de l'oeil comme un système mécanique asservi en position. Ce dernier reçoit une consigne puis il produit un mouvement jusqu'à l'atteindre avec une erreur et un temps de réponse plus ou moins grand que l'on cherche à optimiser. Cependant le système observé

se distingue des systèmes linéaires notamment avec la présence de la latence en début de saccade et aux saccades successives pour arriver à la consigne. On peut néanmoins noter que, si on se base sur les systèmes linéaires, l'overshoot peut être expliqué. En effet dans un système asservi linéaire, lorsque l'on cherche à obtenir un temps de réponse optimal (et notamment le temps de réponse à 5%) alors un dépassement apparaît.

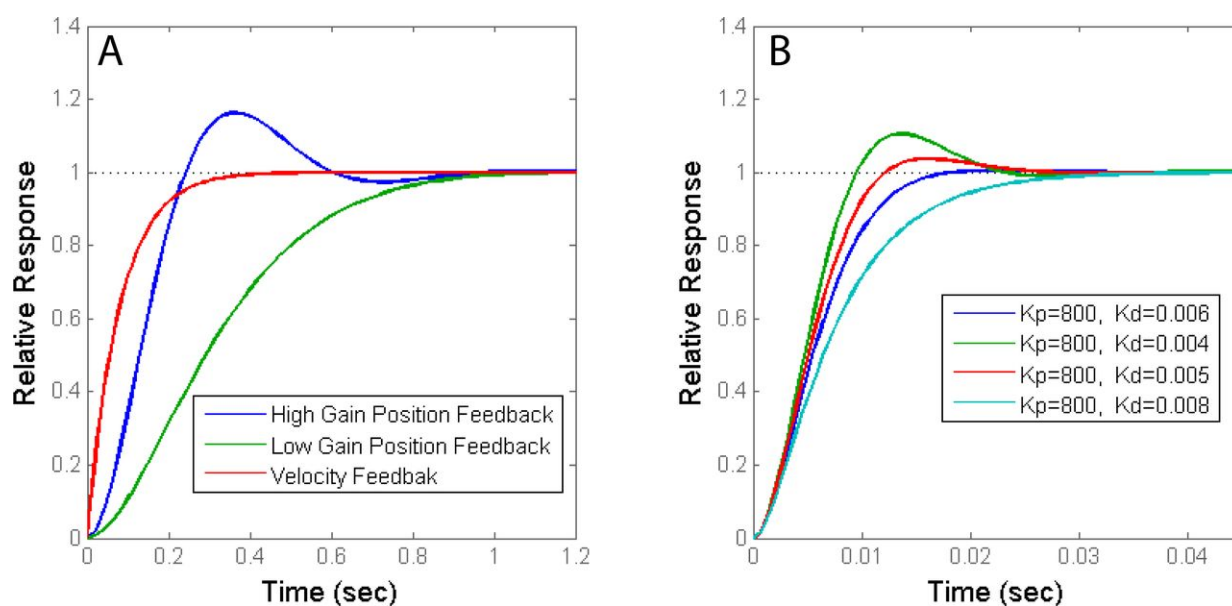


FIGURE 6 – Exemple de réponse pouvant être obtenue par un asservissement linéaire[Avi Caspi 2013]

Il serait ainsi intéressant de comparer l'oeil humain avec des systèmes simples du 2nd ordre (voire 3ème), afin de comparer le système oculo-moteur avec des modèles bien connus et essayer de trouver des raisons logiques au mouvement de l'oeil. Par exemple, regarder si la valeur observée du Dynamic Overshoot correspond au dépassement des systèmes linéaires qui minimise le temps de réponse, ce qui justifierait l'allure du mouvement par des contraintes naturelles évolutives (nécessité de détection rapide pour repérer un danger).

Il convient également de noter que si le comportement de l'oeil est globalement assimilable à un système en boucle fermée, la 1ère saccade obéit à un comportement à boucle ouverte afin de maximiser la rapidité du mouvement, au détriment de la précision, quitte à effectuer une 2ème saccade corrective[Holmqvist 2011a]. Le système semble donc être asservi mais seulement sur des temps discrets correspondants à l'acquisition de l'image par l'oeil et son traitement par le cerveau. Il serait ainsi intéressant d'appliquer certaines théories d'asservissement numérique afin de voir si certaines corrélations peuvent être faites.

Conclusion

Ce projet nous aura permis de nous familiariser avec le domaine de la recherche. Il nous aura permis de travailler de façon très concrète et sur des données réelles. Nous avons pu découvrir en particulier le fonctionnement du système moteur de l'oeil et la représentation de l'image dans le colliculus supérieur. Avec cette expérience nous avons élargi nos connaissances en apportant une vision plus orientée recherche à notre cursus généraliste. L'exploitation des données nous a permis de vérifier des résultats expérimentaux communément admis dans ce domaine de recherche afin de proposer d'autres types de corrélations. Aussi notre vision d'ingénieur nous a permis d'apporter un regard différent sur les phénomènes observés qui peuvent servir de piste de recherche.

L'allure des courbes obtenues est celle qui était attendue afin de vérifier la validité de nos résultats, de plus certains de nos résultats sont en accord avec les hypothèses de Françoise Vitu, bien qu'en contre-courant du consensus actuel, et nous espérons que cela pourra lui être utile pour affiner les modèles de comportement de l'oeil humain.

Annexe

Voici le nuage d'un millier de points correspondant aux expériences successives du sujet selon l'axe horizontal.

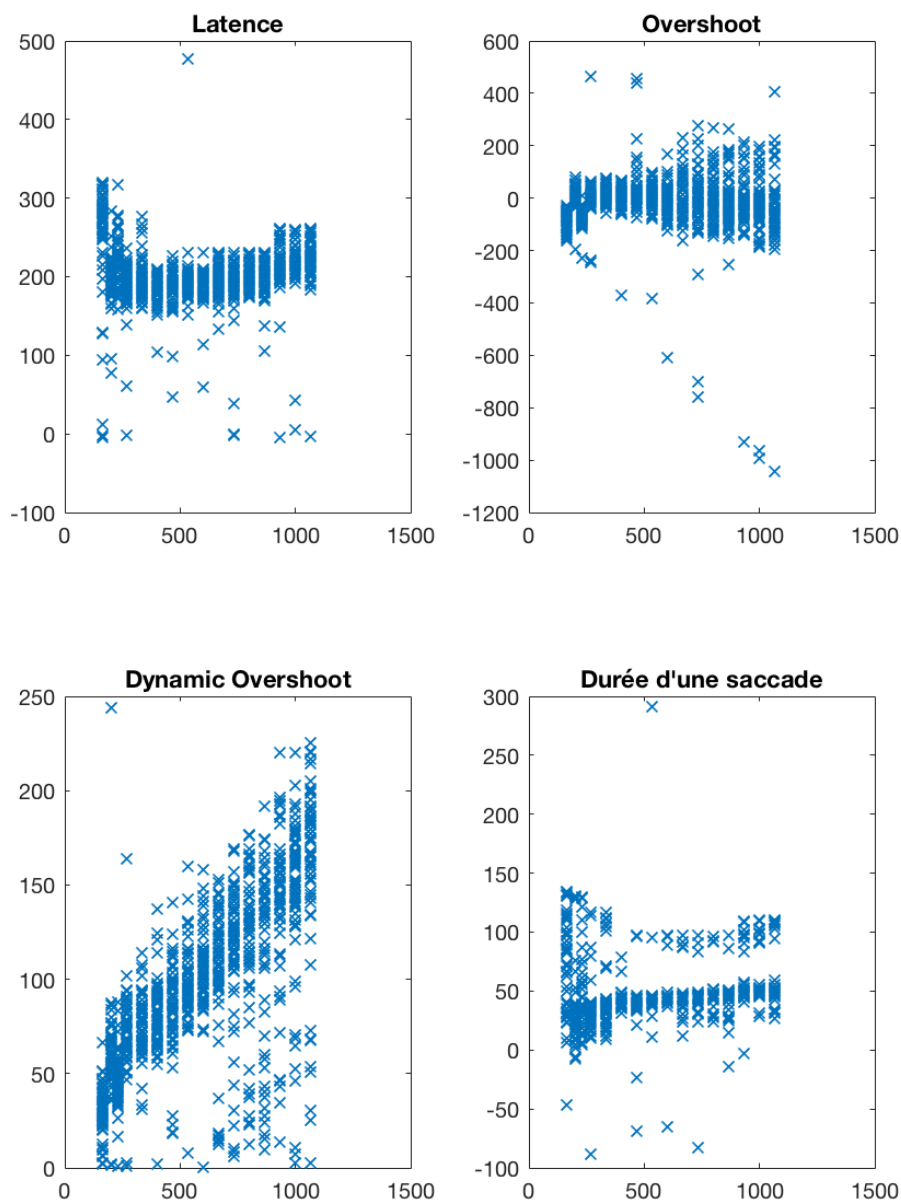


FIGURE 7 – Nuage de point correspondant à l'ensemble des expériences

Références

- [Avi Caspi 2013] Carlos R. Gordon Avi Caspi Ari Z. Zivotofsky. *Multiple Saccadic Abnormalities in Spinocerebellar Ataxis Type 3 Can Be Linked to a Single Deficiency in Velocity Feedback*. 2013.
- [Françoise Vitu 2017] Hossein Adeli Gregory J. Zelinsky Eric Castelet Françoise Vitu Soazing Casteau. *The magnification-factor accounts for the greater hypometria and imprecision of larger saccades : Evidence from a parametric human-behavioral study*. 2017.
- [Heiner Deubel 1994] Bruce Bridgeman Heiner Deubel. *Fourth Purkinje Image Signals Reveal Eye-lens Deviations and Retinal Image Distortions During Saccades*. 1994.
- [Holmqvist 2011a] Kenneth Holmqvist. *Eye Tracking : a comprehensive guide to methods and measures*. chapitre 2, pages 21–34. 2011.
- [Holmqvist 2011b] Kenneth Holmqvist. *Eye Tracking : a comprehensive guide to methods and measures*. chapitre 5, pages 147–184. 2011.
- [Pixel] Max Pixel. *Face Eye Eyes Face Green Human Man Blue Portrait*.
- [Wikipedia 2017] Wikipedia. *Saccade oculaire*. 2017.
-
-

Annexe : Résumé article Saccades oculaires

The magnification-factor accounts for the greater hypometria and imprecision of larger saccades : evidence from a parametric human-behavioral study

Françoise VITU

Introduction

Après observation, on se rend compte que le mouvement des yeux pendant des tâches simples du quotidien, comme par exemple la lecture, n'est pas intuitif. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le mouvement des yeux n'est pas fluide mais complexe, saccadé, les yeux font des allers-retours, sautent des mots, font des pauses...

Pour mieux comprendre le fonctionnement des yeux, des chercheurs se sont penchés sur la question.

Le mouvement saccadique des yeux pourrait être expliqué par une étude approfondie du système oculo-moteur. Afin de développer notre modèle de connaissances, des expériences sur des sujets humains ont été réalisées.

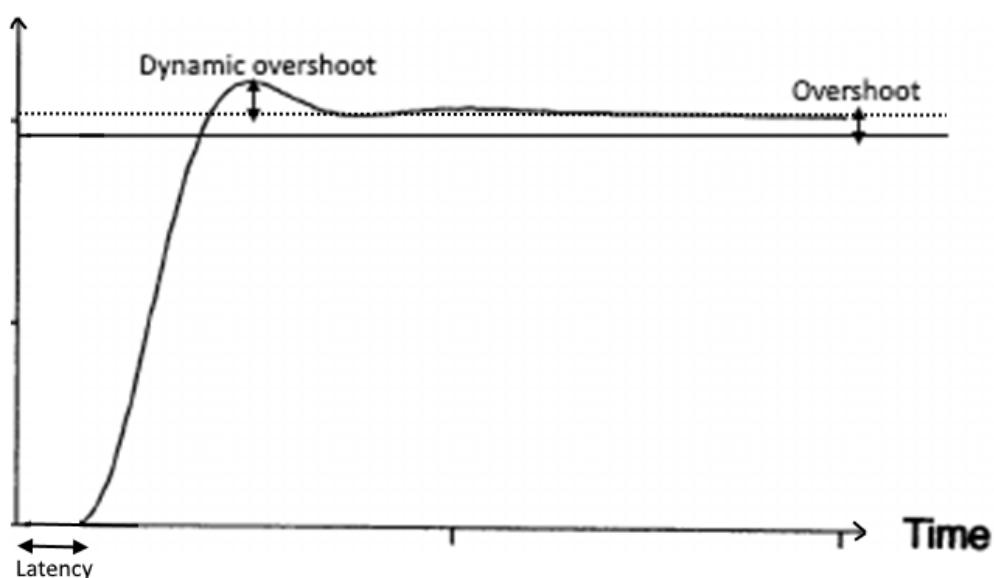
Les saccades undershootent souvent un objet périphérique, d'une valeur de 10% environ. Il est communément admis que c'est dû à un ajustement stratégique du gain de la saccade, opéré en aval du colliculus supérieur (SC).

Le but de l'article est d'étudier si ce n'est pas plutôt lié à une surreprésentation dans le SC des zones de l'espace proches de la fovéa.

Les saccades oculaires

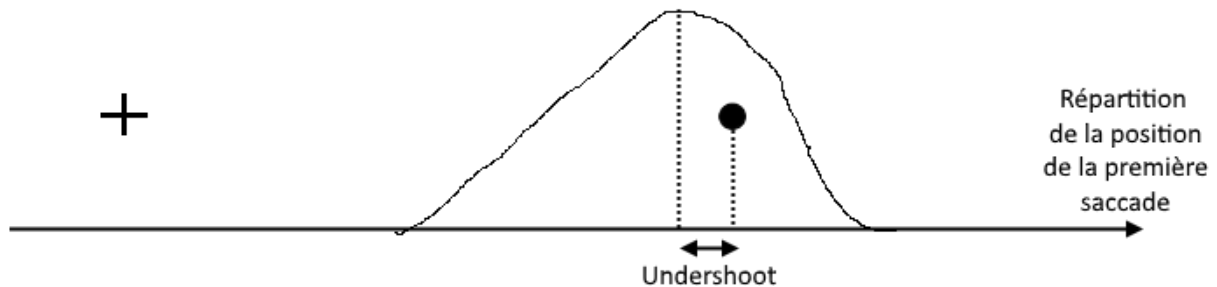
Les saccades sont déterminées par plusieurs paramètres :

- Précision : fin de course de saccade
- Latence de début de mouvement
- Temps de réponse
- Durée
- Courbures
- Vitesse



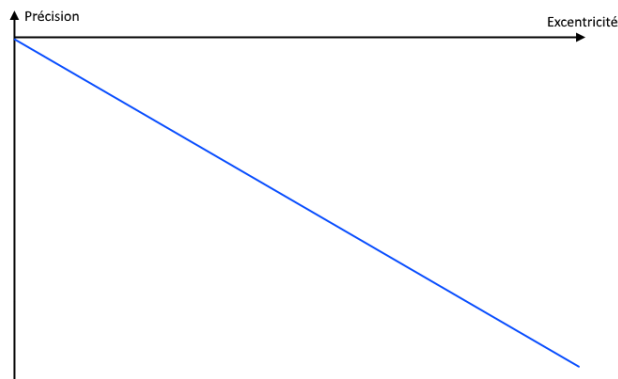
Selon Deubel, ces phénomènes seraient liés au cristallin et plus généralement à des paramètres physiques et biologiques (caractéristiques des muscles de l'œil, viscosité...), et ils varient en fonction de la distance du stimulus.

L'observation de la répartition de la position de la 1^{ère} saccade oculaire donne le résultat suivant :



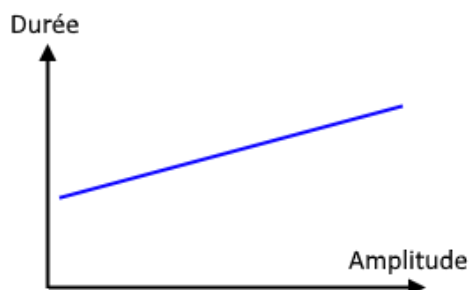
A partir de là, on est en droit de soulever le questionnement suivant : est-ce que l'undershoot augmente linéairement en fonction de l'excentricité ?

Hypothèse :



Idée : L'undershoot résulterait d'une stratégie biologique visant à minimiser les dépenses énergétiques de l'organisme. En effet il est moins coûteux en énergie d'effectuer un undershoot plus de le corriger par glissement, que d'effectuer un mouvement trop ample et de devoir revenir en arrière. C'est également plus efficace en temps de mouvement.

Pour Harris : l'overshoot est une perte importante en temps, en plus d'imposer la nécessité d'une saccade corrective, coûteuse en énergie.

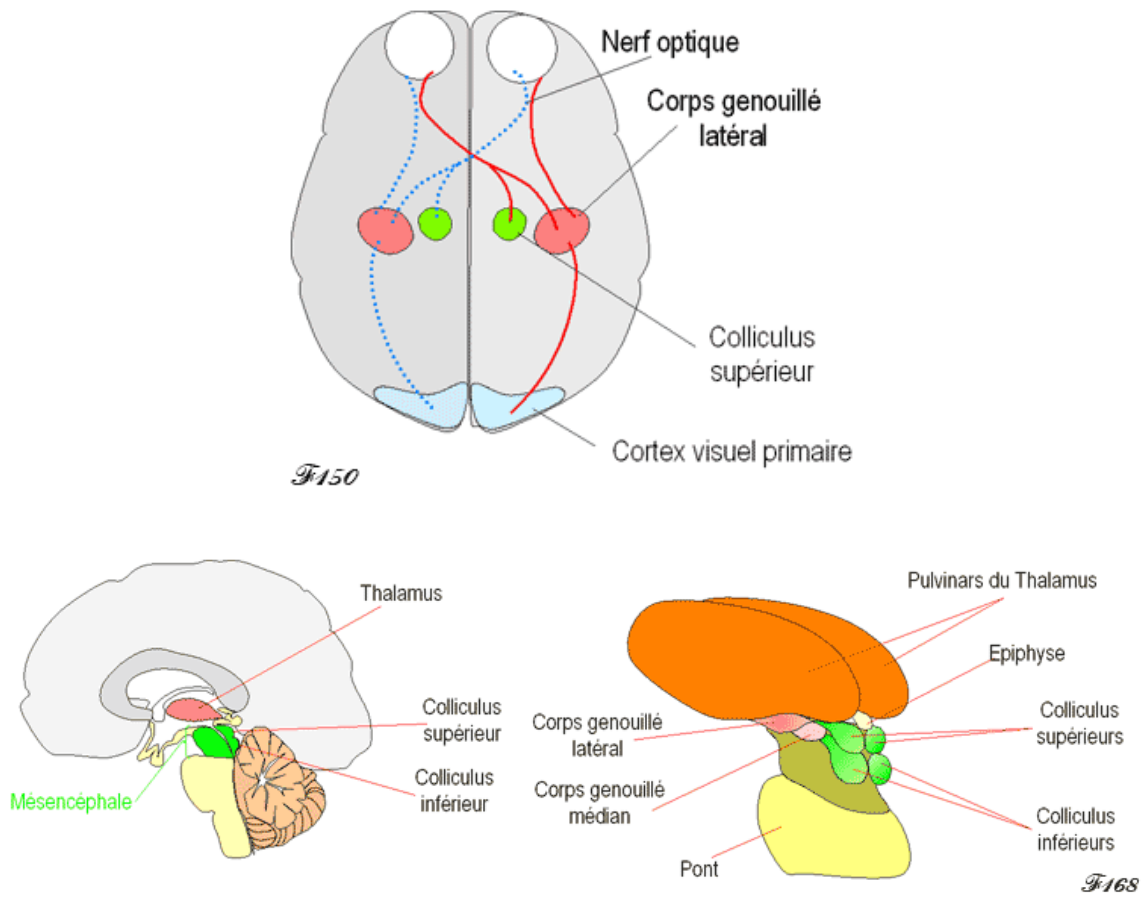


Un consensus scientifique se trouvait autour du fait que la saccade prendrait pour ces raisons biologiques son origine en deçà du colliculus.

Le but de l'article est d'étudier si ce n'est pas plutôt lié à une surreprésentation dans le SC des zones de l'espace proches de la fovéa.

Le colliculus supérieur (SC)

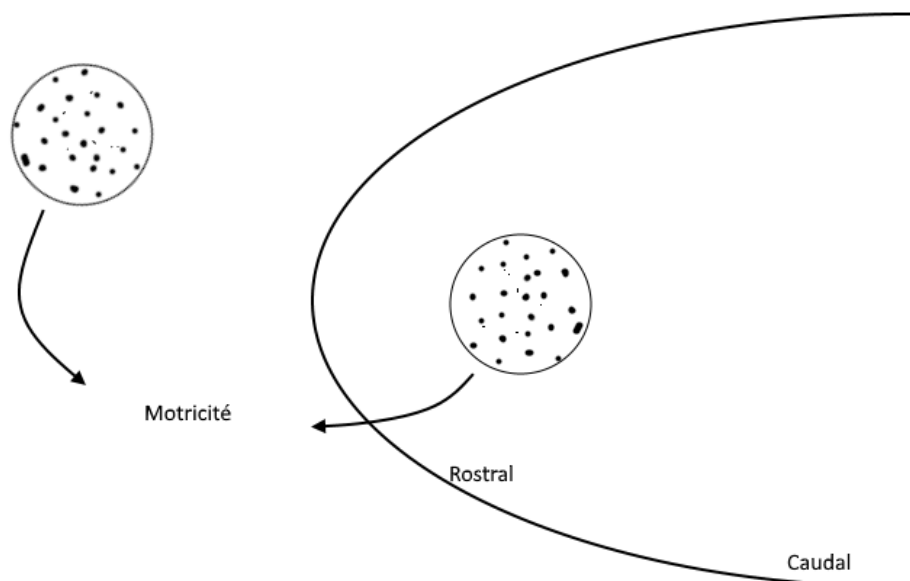
Le colliculus supérieur (SC) est une partie du cerveau qui correspondrait au dernier relais qui envoie l'information aux muscles.



Les neurones sont organisés en « mille-feuille » dans le colliculus, de façon à faire une « carte visuelle » du monde qui nous entoure.

Aire visuelle observée par le sujet

Aire activée dans le colliculus supérieur



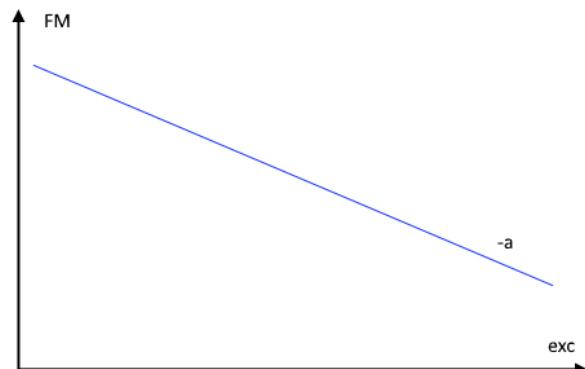
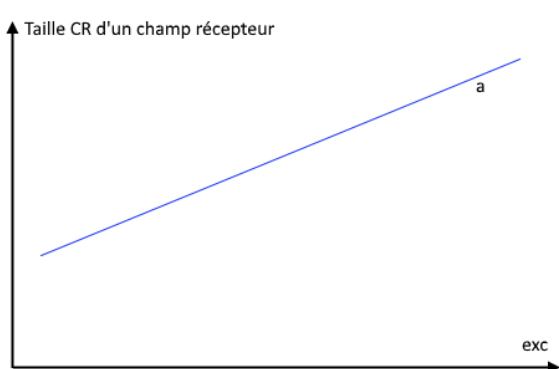
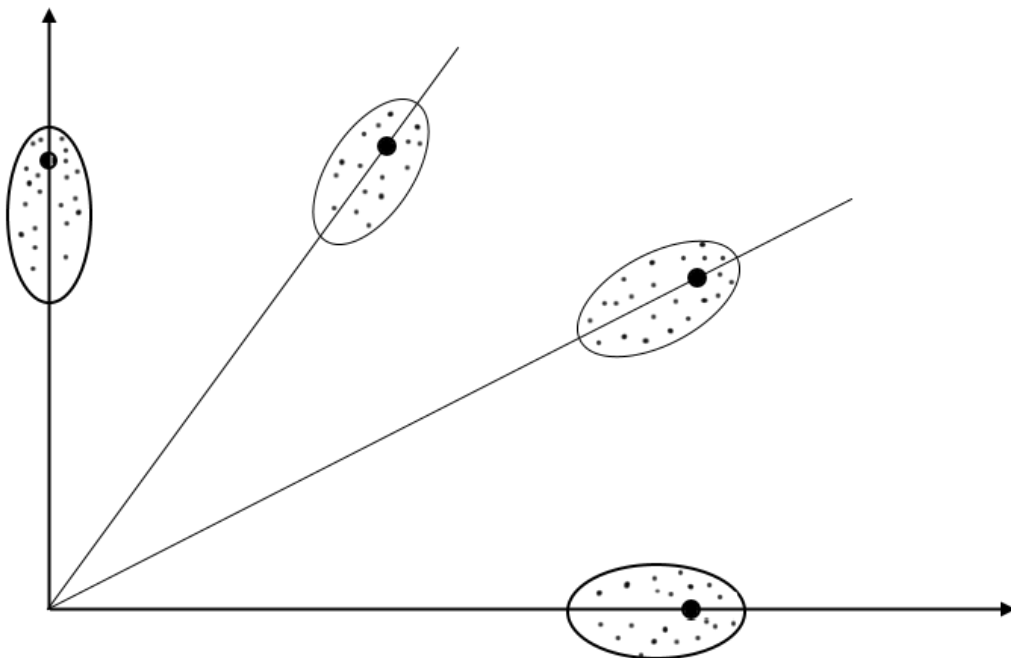
Mais si l'undershoot a bien lieu dans le colliculus, cela implique que l'excentricité aussi. Dans ce cas, pourquoi observe-t-on une variation du gain de la saccade en fonction de l'excentricité ?

Il y a une distorsion de la représentation des zones de l'espace dans l'espace du colliculus, et pour expliquer cela l'hypothèse est faite qu'un facteur de magnification fait son apparition.

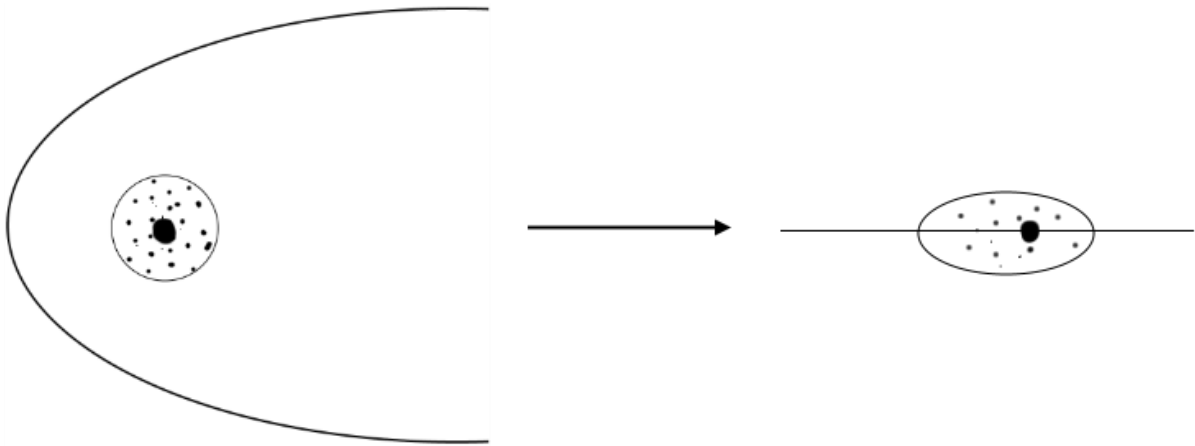
Ce facteur de magnification correspond à la surreprésentation de la fovéa dans le colliculus supérieur. Le FM correspond à la surface activée dans le colliculus d'un degré d'angle visuel. Il est maximal pour un certain angle.

Pour tester cette hypothèse de facteur de magnification (MF), des tests ont été faits sur des sujets soumis à des stimuli visuels successifs.

Il a été établi que le phénomène d'undershoot est commun pour des saccades d'amplitude de 0.5-15° et des directions de regard de 0-90°, et que la distribution des positions de la 1^{ère} saccade devenait allongée et biaisée vers la fovéa lorsque l'excentricité augmente.



Les pentes se compensent.



Conclusion

L'hypothèse sur le MF a également été confirmée par le fait que :

1. L'augmentation linéaire de l'undershoot et l'asymétrie se compensaient
2. La distribution des positions devient circulaire et de taille constante dans le SC

Cette étude montre clairement que l'undershoot prend pour origine dans le SC ou en amont, plutôt qu'être un reflet de stratégies d'adaptation évolutive.

NB : Les liens logiques pour la dernière partie ne sont pas complètement corrects, en effet certaines causalités avaient été incomprises et ont pu être éclairées lors de notre 2^{nde} rencontre avec Françoise Vitu