



disposer les frontières



"Expérimenter sur l'animal pour comprendre et soigner les humains"
 Journée SHESVIE 2024
 Société d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie
 Tours, 30 mai 2024



Centre Gilles Gaston Granger
 U M R 7 3 0 4

Neurophysiologie de l'orientation visuelle du regard: Apports des études chez le singe macaque

laurent.goffart@cirs.fr

diaporama accessible sur
<https://cv.hal.science/laurent-goffart>
 hal-04584424

Dans mon exposé, je vais parler moins de l'importance des travaux neurophysiologiques et neuro-anatomiques qui ont été menés au cours des six dernières décennies avec des animaux (singes, chats) pour comprendre certains désordres neurologiques (oculomoteurs) humains que de







- leur valeur épistémologique pour comprendre comment un mouvement (oculaire) est produit,
- leurs enseignements pour celles et ceux qui croient que l'enregistrement des mouvements (oculaires) permet de sonder le substrat cérébral :
 - de la perception,
 - de l'adaptation,
 - de la cognition,
 - de l'intelligence,
 - des états mentaux,
 - de l'esprit,
 - etc.

2020

Edinburgh Studies in Mathematics: 12020: 194-140: 200
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-09948-1>

Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review

Anselm R. Stricker¹ · Kelsey J. MacKay² · Andreas Obersteiner³ · Kristina M. Reiss¹

Published online: 9 June 2020

Abstract
 Eye tracking is an increasingly popular method in mathematics education. While the technology has greatly evolved in recent years, there is a debate about the specific benefits that eye tracking offers and about the kinds of insights it may allow. The aim of this review is to contribute to this discussion by providing a comprehensive overview of the use of eye tracking in mathematics education research. We reviewed 161 eye-tracking studies published between 1921 and 2018 to assess what domains and topics were addressed, how the method was used, and how eye movements were related to mathematical thinking and learning. The results show that most studies were in the domain of numbers and arithmetic, but that a large variety of other areas of mathematics education research was investigated as well. We identify a need to report more methodological details in eye-tracking studies and to be more critical about how to gather, analyze, and interpret eye-tracking data. In conclusion, eye tracking seemed particularly beneficial for studying processes rather than outcomes, for revealing mental representations, and for assessing subconscious aspects of mathematical thinking.

Keywords Cognitive processes · Eye movements · Eye tracking · Mathematics education · Numerical cognition

2013

Using Eye Movements and Spoken Discourse as Windows to Inner Space

ROGER JOHANSSON, JANA HOLSANOVA, and KENNETH HOLMQUIST

Abstract
 The purpose of this chapter is to show how eye-tracking methodology can be used as a direct link between physical space and conceptual space, both from a theoretical point of view—the existence (or not) of internal image representations, and from an applied point of view—the usage of an “inner space” in thinking, reasoning, and communication.
 First, we introduce the reader to the mental imagery debate. Second, we summarize studies on mental imagery in different areas of research. Third, we focus on our studies, described in Johansson et al. (2001, 2008), where we developed a method to study “inner space,” and showed that eye movements do to a high degree reflect spatiality during verbal reports of both pictures and spoken scene descriptions. Fourth, we discuss theoretical implications, advantages, and limitations of this methodology and relate them to current theories of mental imagery perception, and mental simulation. Fifth, we mention relevant application areas and show how our method can be used in thinking, reasoning, and communication.

2016

Exploring the numerical mind by eye-tracking: a special issue

Markus Hartmann¹, Martin H. Fischer²

This Special Issue highlights how the eyes can be used as a window onto the mathematical mind, and will hopefully further promote the use of eye-tracking in numerical cognition research.

2018

Eye Position Reflects the Spatial Coding of Numbers During Magnitude Comparison

Sarael Salvaggio¹, Nicolas Masson^{1,2}, Alexandre Zemon¹, Michael Andler¹

Abstract
 Behavioral studies have suggested that number manipulation involves shifting attention along a left-to-right oriented continuum. However, these studies provide little evidence about the time course of attention shifts during number processing. We used an eye-tracker with high spatio-temporal resolution to measure eye movements during the mental solving of addition (e.g., 4 + 4) and subtraction problems (e.g., 33 - 8), as a proxy for the rightward and leftward attention shifts that accompany these operations. A firm difference in eye position was observed as soon as the operator was heard: the hearing and response onset latencies shifted the eye rightward and upward compared to subtraction, suggesting that the space used to represent the problem is bidimensional. Further analysis confirmed the fast deployment of spatial attention and its involvement in relationship with the carrying and borrowing procedures triggered by the problem presentation. The predictive role of horizontal eye movements, in particular, is essential to understand how attention contributes to answer about the range of possible answers. We propose that attention illuminates significant portions of the numerical continuum anticipatorily to guide the search of the answer and facilitate the implementation of solving procedures in verbal working memory.

2022

The predictive role of eye movements in mental arithmetic

Sarael Salvaggio¹, Nicolas Masson^{1,2}, Alexandre Zemon¹, Michael Andler¹

Abstract
 Behavioral studies have suggested that number manipulation involves shifting attention along a left-to-right oriented continuum. However, these studies provide little evidence about the time course of attention shifts during number processing. We used an eye-tracker with high spatio-temporal resolution to measure eye movements during the mental solving of addition (e.g., 4 + 4) and subtraction problems (e.g., 33 - 8), as a proxy for the rightward and leftward attention shifts that accompany these operations. A firm difference in eye position was observed as soon as the operator was heard: the hearing and response onset latencies shifted the eye rightward and upward compared to subtraction, suggesting that the space used to represent the problem is bidimensional. Further analysis confirmed the fast deployment of spatial attention and its involvement in relationship with the carrying and borrowing procedures triggered by the problem presentation. The predictive role of horizontal eye movements, in particular, is essential to understand how attention contributes to answer about the range of possible answers. We propose that attention illuminates significant portions of the numerical continuum anticipatorily to guide the search of the answer and facilitate the implementation of solving procedures in verbal working memory.

Science 2009

Recruitment of an Area Involved in Eye Movements During Mental Arithmetic

André Basso^{1,2}, Raphaël Trieben¹, Vincent Bédin^{1,2}, Sandrine Dehaene^{1,2,3,4}, Roger W. Rubinsten^{1,2}

Given the cultural link in left-to-right readers between small numbers and the left side of space, and large numbers and the right side of space, we predicted that mental addition, which increases number size, would be associated with a rightward shift of attention and subtraction with a leftward shift. Hence, the activation pattern in the parietal cortex, during addition would resemble the activation pattern associated with a rightward eye movement, whereas subtraction would resemble in leftward eye movements.

Correspondences 2010

Eye position predicts what number you have in mind

Tobias Loetscher^{1,2}, Christopher J. Beckers^{1,3}, Michael E.B. Hecht^{1,2}, and Peter Brugger¹ *Current Biology*

L'addition déplacerait les yeux vers la droite et le haut ... suggérant que l'espace utilisé pour représenter le problème serait bidimensionnel!

Cerveau et mathématiques

Jean-Pierre Changeux (1989):

"Les mathématiques sont dans le cerveau du mathématicien, en particulier dans sa mémoire à long terme."

Alain Berthoz (2005):

Les mathématiques sont "l'expression de lois et de mécanismes qui sont en opération dans le cerveau" ... *"un langage du cerveau sur le cerveau lui-même, c'est-à-dire, puisque le cerveau fait partie du monde physique, [un langage] sur l'Univers et ses lois."*

Stanislas Dehaene (2010):

"Les nombres, comme tous les objets mathématiques, sont des constructions mentales dont les racines plongent ... dans l'adaptation du cerveau humain aux régularités de l'univers."

Stanislas Dehaene (2012):

"Tous les cerveaux humains reçoivent en partage, dès la naissance, des représentations mentales sophistiquées, indépendantes du langage que l'on peut qualifier de «proto-mathématiques». Au cours de son évolution, notre cerveau a été doté de représentations élémentaires de l'espace, du temps et du nombre, que nous partageons avec de nombreuses autres espèces animales, et qui sont au fondement de nos intuitions mathématiques."

Thèse de l'épistémologie évolutionniste

Franz Wuketits (1984):

"Par un processus d'adaptation, les **systèmes vivants** accumulent de plus en plus d'informations sur leur environnement et représentent ainsi la structure de l'environnement dans lequel ils vivent ; meilleure est la représentation de l'environnement, meilleures sont les chances de survie."

Il y a "une relation **isomorphique** entre les motifs de la nature les motifs de la cognition."

Konrad Lorenz (1941):

"Considérée comme une hypothèse de travail ou comme un organe fonctionnel, la forme de pensée de quantification numérique est et reste l'un des appareils les plus miraculeux que la **nature** ait jamais créés."

Herbert Spencer (1872):

"Les rapports d'espace ont été les mêmes, non seulement pour tous les hommes, pour tous les primates et tous les ordres de mammifères dont nous descendons, mais aussi pour tous les ordres d'êtres moins élevés. Ces rapports d'espace constants sont exprimés dans des structures nerveuses définies, congénitalement constituées pour agir d'une manière déterminée, et incapables d'agir d'une manière différente."

The collage displays various scientific works by Andreas Nieder, including:

- Trends in Cognitive Sciences 2021**: Review of "The Evolutionary History of Brains for Numbers" (Andreas Nieder).
- Journal of Experimental Biology 2021**: "Neuroethology of number sense across the animal kingdom" (Andreas Nieder).
- Trends in Ecology and Evolution 2020**: Review of "The Adaptive Value of Numerical Competence" (Andreas Nieder).
- Current Opinion Neurobiology 2020**: "Neural constraints on human number concepts" (Andreas Nieder).
- Philosophical Trans/ Royal Soc. 2017**: "Evolution of cognitive and neural solutions enabling numerosity judgements: lessons from primates and corvids" (Andreas Nieder).
- Nature Reviews Neuroscience 2016**: "Letter Number Faculty Is Rooted in Our Biological Heritage" (Andreas Nieder).
- Journal of Comparative Physiology 2013**: "The neuronal code for number" (Andreas Nieder).
- Annual Review Neuroscience 2009**: "Representation of Number in the Brain" (Andreas Nieder and Stanislas Dehaene).
- PNAS 2004**: "A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey" (Andreas Nieder and Earl K. Miller).
- PNAS 2004**: "Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex" (Oana Tufanalar and Andreas Nieder).

A red arrow points to a box containing the text: **voir critique dans HAL hal-04574897**.

Critique épistémologique

Au cours des dernières décennies, une **confusion** s'est installée dans les neurosciences cognitives entre

- les **mesures** quantitatives (valeurs numériques et transformations),
- les **processus physiologiques** qui engendrent le phénomène mesuré et
- certaines notions générales appartenant à notre langage (**concepts**).

L'association de notions très générales aux mesures ont conduit des auteurs à imaginer, dans le cerveau, un **encodage** de l'espace, du temps, des nombres, de la durée d'un mouvement, de sa vitesse, de son accélération, de la géométrie et de l'arithmétique.

The collage includes the following items:

- 2011**: Book cover "SPACE, TIME AND NUMBER IN THE BRAIN" by Andreas Nieder.
- 2019**: Book cover "A BRAIN FOR NUMBERS" by Andreas Nieder.
- 2000**: Article "Encoding of movement time by populations of cerebellar Purkinje cells" (Peter Thier, Peter W. Dicke, Hans-Rainer G. Dussan-Basse).
- 2004**: Article "Arithmetic and the brain" (Stanislas Dehaene, Nicolas Molko, Laurent Cohen and Anna J. Wilson).
- 2007**: Article "AN ENHANCED ARGUMENT FOR INNATE ELEMENTARY GEOMETRIC KNOWLEDGE AND ITS PHILOSOPHICAL IMPLICATIONS" (Helen De Cizez).

Le paradigme de la motricité oculaire

Dans l'étude des processus cérébraux mobilisés lors des mouvements d'orientation du regard vers une cible visuelle, certains auteurs ont proposé que les paramètres cinématiques seraient « codés » dans l'activité des cellules neuronales. Pendant qu'ils émettent des potentiels d'action, **les neurones « parleraient une langue »** traduisible avec les notions de la mécanique classique.

Pourtant, les mouvements étudiés (rotation des globes oculaires et de la tête) sont la **mesure** de leur changement d'orientation physique, lequel est provoqué par un changement de contraction de plusieurs muscles (extra-oculaires et nucaux), **changements musculaires** qui eux-mêmes sont sous le contrôle de plusieurs groupes de neurones à l'origine des nerfs moteurs, lesquels neurones sont influencés par de **multiples processus parallèles** dans le cerveau.

Une mise en correspondance est faite entre :

- la série totalement ordonnée des valeurs numériques (mesures de direction du regard et de la cible)
- une structure radicalement différente, **diffuente** puis **confluente**, dont
 - les éléments sont spatialement distribués et
 - les activités se chevauchent temporellement.

Entre les nerfs optiques et les nerfs moteurs

Cas d'un spot lumineux dans le champ visuel

Aux extrémités des deux nerfs optiques, une excitation rétinienne ponctuelle déclenche des flux d'activité qui, dans le cerveau, se manifestent comme une sorte d'**explosion arborescente (diffiuse)**. L'activité se propage, distribuée dans de multiples foyers et plus ou moins persistante.

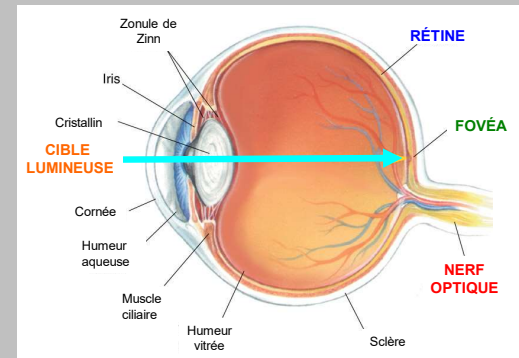
A mesure que l'activité se propage et rejoint les groupes de cellules à l'origine des nerfs moteurs (innervation des muscles extra-oculaires et nucaux), cette **explosion** devient une **compression (confluence)** dont :

- la durée va déterminer la durée du mouvement et
- le recrutement de nouveaux groupes neuro-musculaires son ampleur : $\Delta(\text{yeux+tête}) > \Delta(\text{yeux})$.

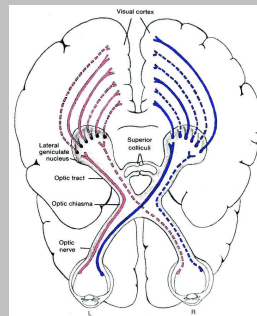
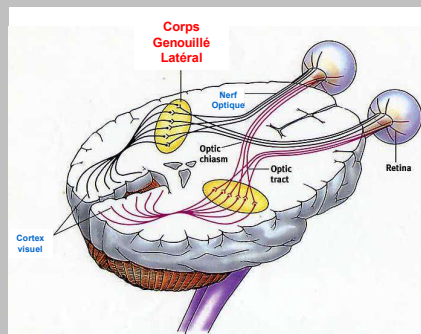
Alors que la trajectoire d'un corps **rigide** (œil ou objet) dans le monde physique peut être mathématiquement décrite comme une courbe sans épaisseur, son corrélat cérébral est spatialement et temporellement différent : il est **épais, expansif et élastique**.

L'œil

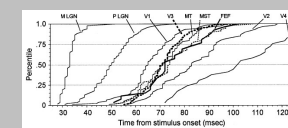
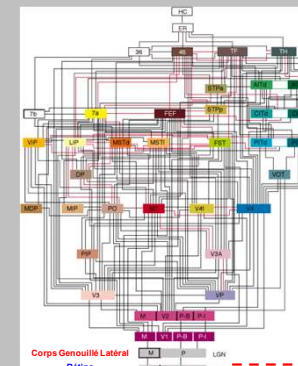
coupe sagittale



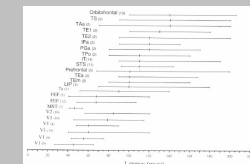
Au bout du nerf optique



Explosion des signaux visuels: diffiuse spatiale et temporelle



Schmolesky et al. J Neurophysiol 1998



Nowak & Bullier Cerebral cortex: extrastriate cortex in primates 1997



Felleman & Van Essen Cerebral Cortex 1991

Schéma incomplet :

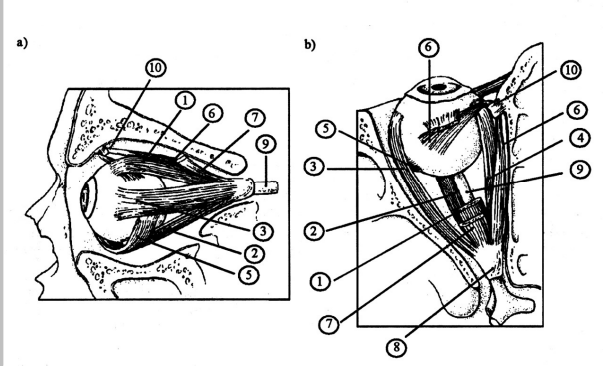
Colliculus Supérieur

Noyau du Tractus Optique

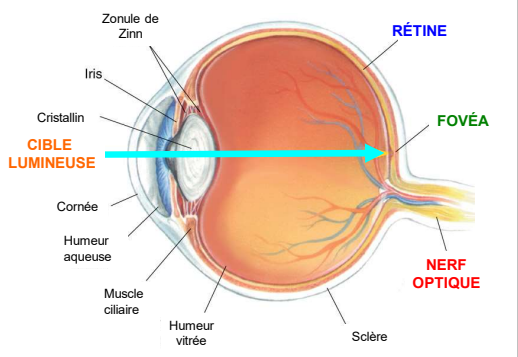
Pulvinar

etc.

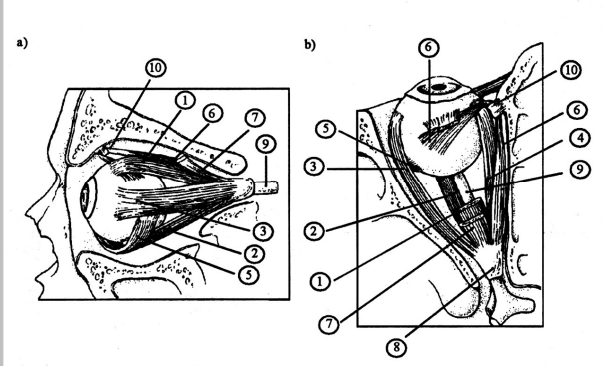
L'œil n'est pas seulement une rétine



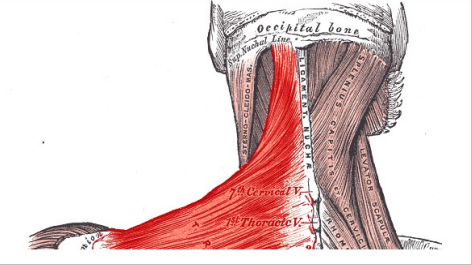
Projection de la cible sur la fovéa (fovéation)



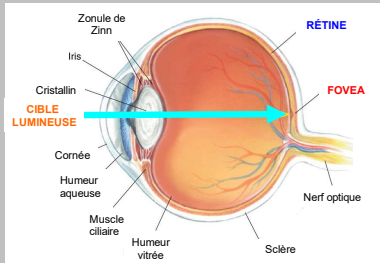
Projection de la cible sur la fovéa (fovéation)
SI & SSI contraction appropriée des muscles extraoculaires
 (direction du regard)



Projection de la cible sur la fovéa (fovéation)
SI & SSI contraction appropriée des muscles nucaux
 (direction de la tête)



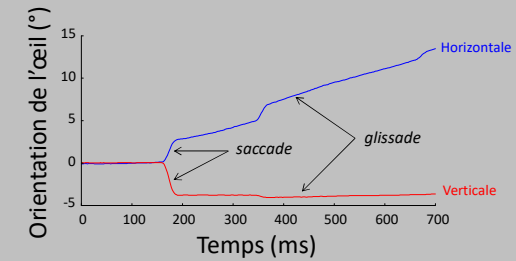
REGARDER UNE CIBLE (fovéation) = contracter une multitude de muscles



Deux types de mouvement oculaire en réponse au mouvement d'une cible

rapide : saccade
lent : glissade (poursuite)

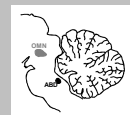
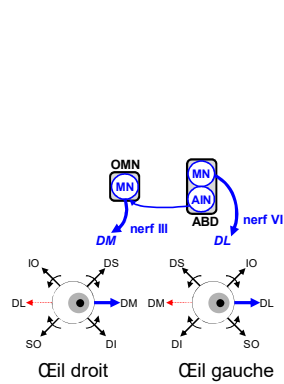
mêmes muscles impliqués mais réseaux neuronaux en amont largement distincts



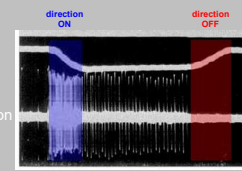
valeurs > 0 : droite / haut
valeur = 0 : droit devant
valeurs < 0 : gauche / bas

A l'origine des nerfs moteurs oculaires

SACCADE VERS LA GAUCHE



MN

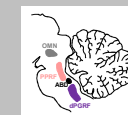
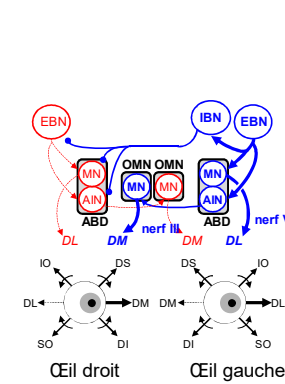


modifié à partir de Fuchs & Luschei J Neurophysiology 1970

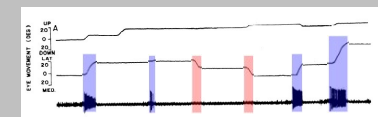
modifié de Goffart, Quinet & Bourelly *Encycl. Human Brain* 2024
hal-03541980

A l'origine des nerfs moteurs oculaires

SACCADE VERS LA GAUCHE



EBN

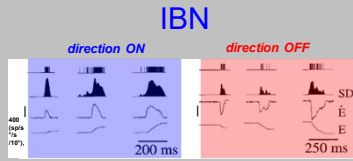
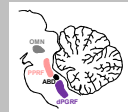
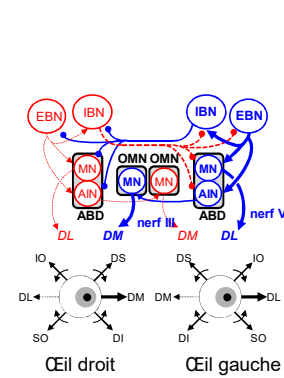


Keller J Neurophysiology 1974

modifié de Goffart, Quinet & Bourelly *Encycl. Human Brain* 2024
hal-03541980

A l'origine des nerfs moteurs oculaires

SACCADE VERS LA GAUCHE

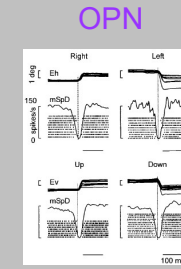
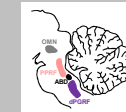
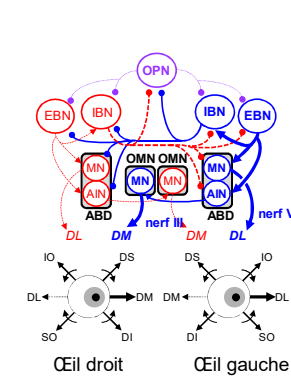


Cullen & Guitton *J Neurophysiology* 1997

modifié de Goffart, Quinet & Bourrelly *Encycl. Human Brain* 2024
hal-03541980

A l'origine des nerfs moteurs oculaires

SACCADE VERS LA GAUCHE

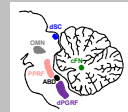
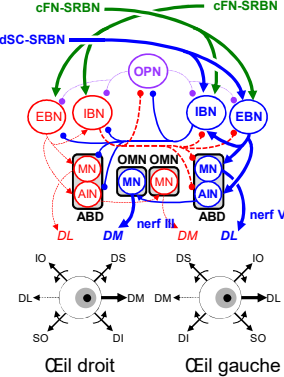


Missal & Keller *J Neurophysiol* 2004

modifié de Goffart, Quinet & Bourrelly *Encycl. Human Brain* 2024
hal-03541980

Confluence

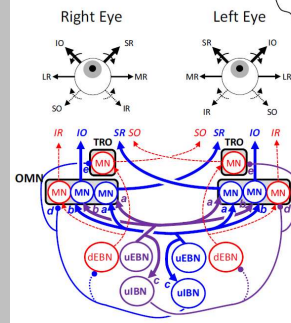
SACCADE VERS LA GAUCHE



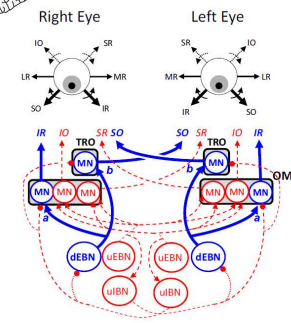
modifié de Goffart, Quinet & Bourrelly *Encycl. Human Brain* 2024
hal-03541980

Confluence

UPWARD SACCADE



DOWNWARD SACCADE



Goffart, Quinet & Bourrelly *Encycl. Human Brain* 2024
hal-03541980

Ce savoir n'a été acquis ni par la PSYCHOLOGIE, ni par l'IMAGERIE CÉRÉBRALE, ni par la MODÉLISATION COMPUTATIONNELLE mais par la NEUROPHYSIOLOGIE, l'EXPÉRIMENTATION ANIMALE en association avec LA NEUROLOGIE CLINIQUE

Orienter les yeux et la tête vers la gauche

Regarder une cible qui se rapproche

Poursuivre une cible (glissade)

hal-03541980

Deux types de mouvement oculaire en réponse au mouvement d'une cible

rapide : saccade
 lent : glissade (poursuite)

$\frac{\text{amplitude } H}{\text{durée } H} : \text{vitesse } \dot{H}$
 $\dot{H}_{\text{oeil}} - \dot{H}_{\text{cible}} : \text{écart de vitesse } \dot{H}$
 $H_{\text{oeil}} - H_{\text{cible}} : \text{écart de position } H$
 $\ddot{H}_{\text{oeil}} - \ddot{H}_{\text{cible}} : \text{écart d'accélération } \ddot{H}$

valeurs > 0 : droite / haut
 valeur = 0 : droit devant
 valeurs < 0 : gauche / bas

Grandeurs cinématiques et arithmétique dans le cerveau ?

CIRCUIT GLISSADE

E_A : écart d'accélération
 E_V : écart de vitesse
 E_P : écart de position
 Commande glissade
 Groupes musculaires

Lisberger, Morris & Tychsen Annual Review of Neuroscience 1987

CIRCUIT SACCADÉ

Ecart Moteur =
 Positions (désirée - courante)
 Déplacements (désiré - parcouru)

Sparks Nature Neuroscience Reviews 2002

Grandeurs cinématiques et arithmétique dans le cerveau?

ISOMORPHISME CERVEAU - MODÈLE

REMIS EN QUESTION

Mesures cinématiques (spatiales / temporelles)

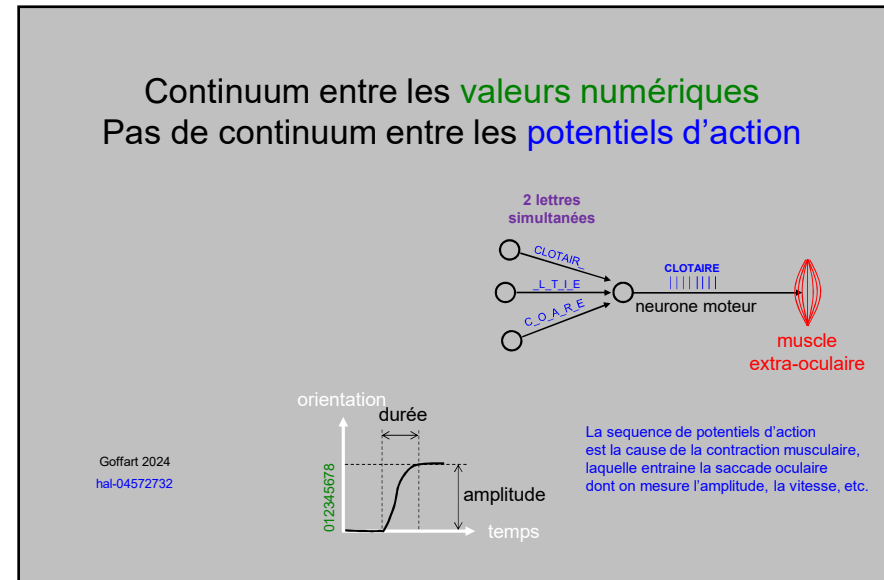
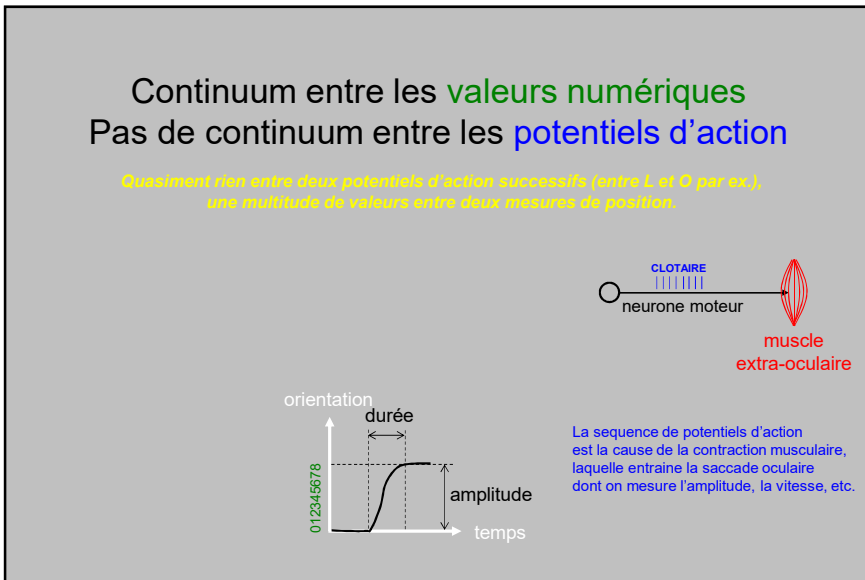
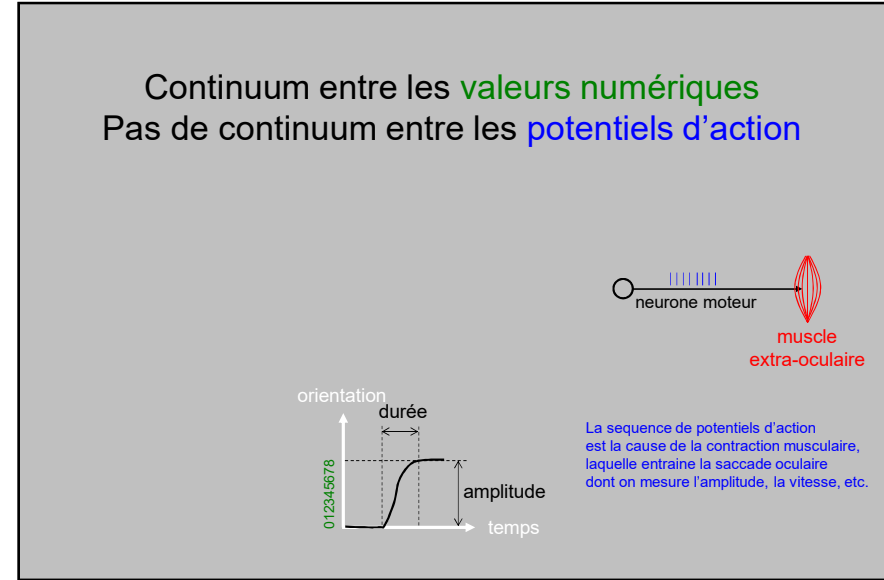
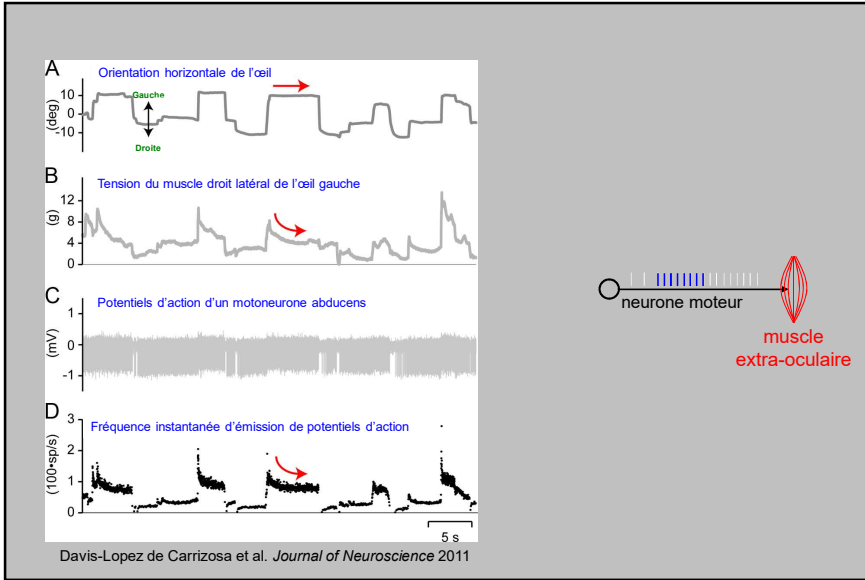
comportement

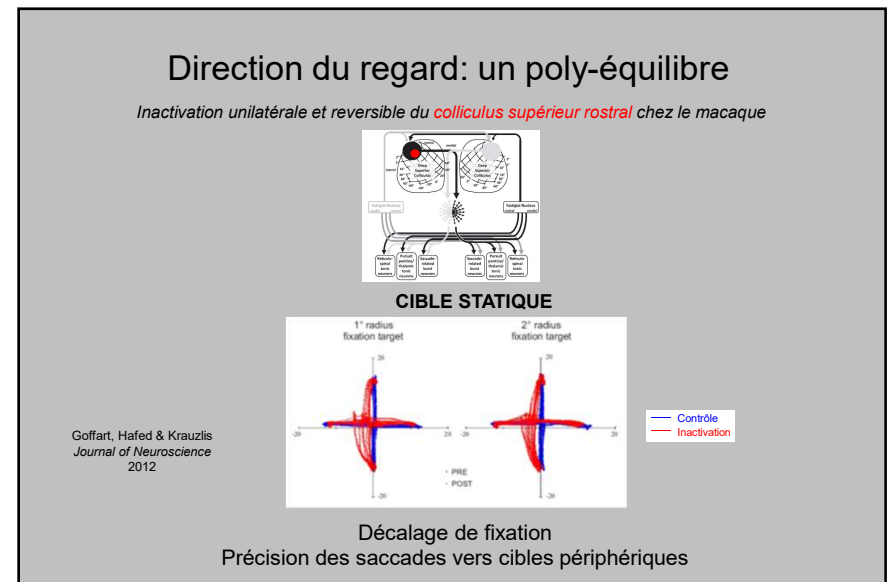
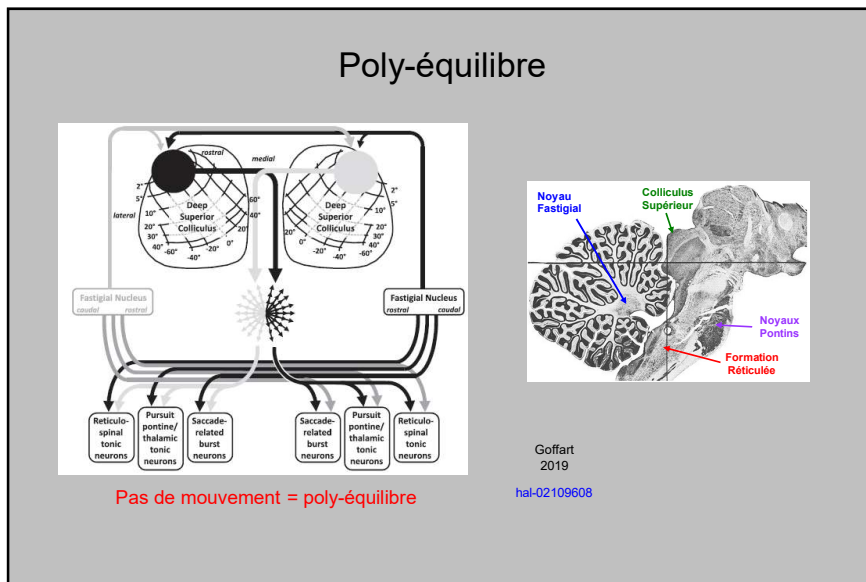
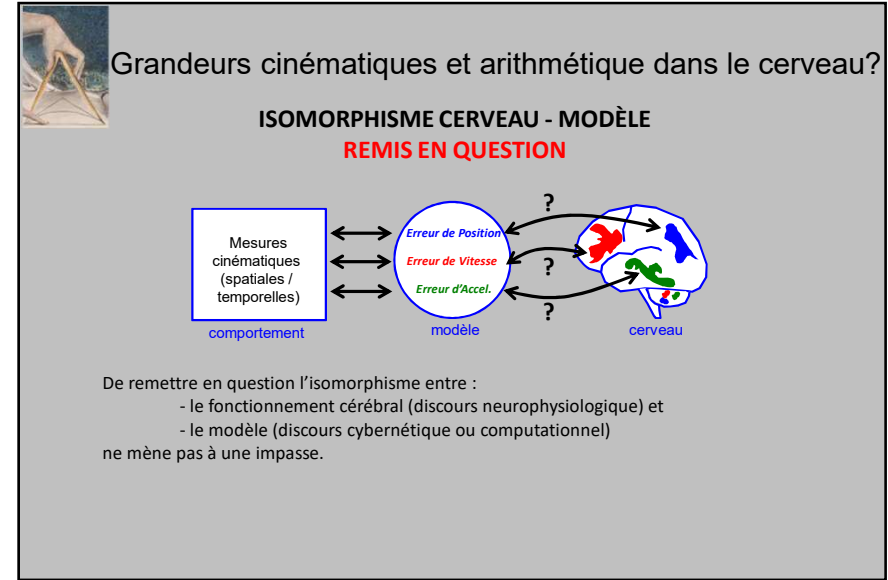
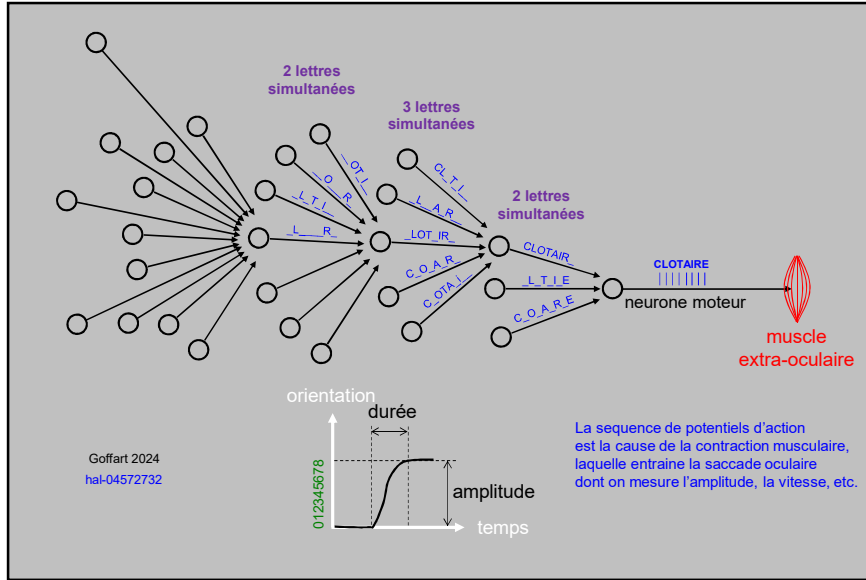
modèle

cerveau

Erreur de Position
 Erreur de Vitesse
 Erreur d'Accel.

Mesurer et modéliser le mouvement du globe oculaire (corps rigide) avec des notions cinématiques n'implique pas nécessairement une équivalence dans le cerveau, à savoir que l'activité des neurones "code" (c'est-à-dire qu'ils **émettent des signaux correspondant à**) l'amplitude, la vitesse ou l'accélération du mouvement de l'œil, et leur différence avec celles de la cible.

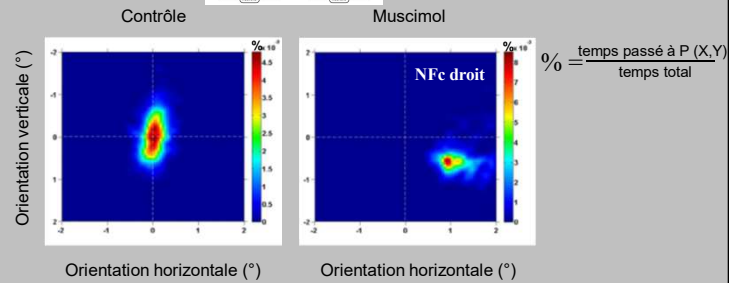
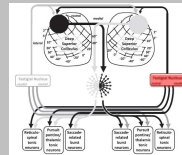




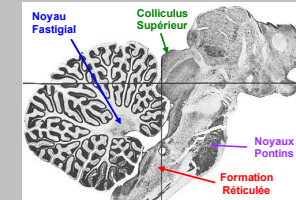
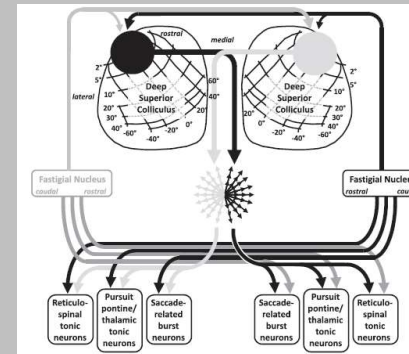
Direction du regard: un poly-équilibre

Inactivation unilatérale et réversible du **noyau fastigial caudal** chez le macaque

Guerrasio, Quinet, Büttner & Goffart
Journal of Neurophysiology
2010



Poly-équilibres et restauration



Goffart
2019

hal-02109608

Pas de mouvement = poly-équilibre
Mouvement = restauration du poly-équilibre

Conclusion

En réduisant l'**esprit** au **cerveau**, le **développement intellectuel** à la "**maturation**" **cérébrale**, une confusion s'est répandue dans les neurosciences cognitives entre le **fonctionnement cérébral d'un individu** et l'**évolution historique et collective d'un discours** scientifique mémorisé dans des livres (stockés dans des bibliothèques) et obéissant à une logique booléenne. Rien ne nous autorise à imaginer que le fonctionnement cérébral soit soumis à de pareilles contraintes.

Les limitations des mesures et les notions théoriques qui leur étaient un peu trop hâtivement associées ont conduit **quelques auteurs** et surtout une **multitude de "suiveurs"** à soutenir des thèses nativistes et évolutionnistes, comme celles d'un codage dans le cerveau de l'espace, du temps, des nombres, de la géométrie et de l'arithmétique

Les neurosciences cognitives ont négligé le fait qu'une multitude de **structures cognitives** sont **externes** à l'individu, à savoir les "**instruments externes** (livres, bibliothèques, instruments de calcul et d'observation...) et les **structures sociales** de productions et de cumulation des connaissances (encyclopédies, sociétés savantes etc.)" (**Aurox** 1998).

"**Les hommes [et les femmes] qui ... parviennent à constituer des objets abstraits, et constituent de ce fait des théories mathématiques, sont ... des hommes [et des femmes] au pluriel, des hommes [et des femmes] concrets agissant dans des conditions historiquement déterminées, et non pas des sortes d'excroissances d'un «sujet cognitif».** **Doridot & Panza** 2004

"**Le siège de la rationalité scientifique n'est pas le scientifique individuel mais la communauté scientifique**" (**Solomon** 1996)

Les études neurophysiologiques et neuro-anatomiques chez le singe et le chat ne permettent pas seulement de comprendre les **désordres moteurs (oculaires) humains**. Elles constituent un socle de connaissances fondamentales sur la base duquel toute connaissance nouvelle devrait pouvoir s'intégrer, au risque de favoriser la prolifération d'études infondées, parfois pseudo-scientifiques et, en conséquence, de discréditer la rigueur scientifique.

Merci de votre attention

