

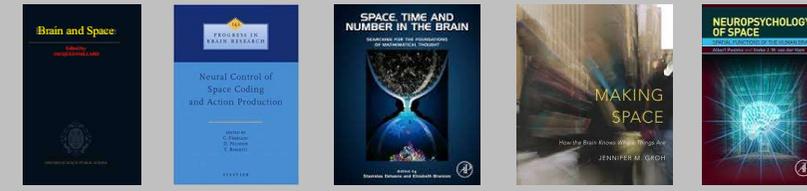


Itinéraire pour une contribution de la
Neurophysiologie de l'orientation du regard
à la recherche des conditions de possibilité de
l'intuition spatiale

Laurent GOFFART
Habilitation à diriger les recherches
Marseille, 2 octobre 2020

Logos: Cjrs (dépasser les frontières), int neurosciences, Aix-Marseille Université

Espace versus intuition spatiale



1991 2003 2011 2014 2016

STRATEGIE :
ne pas postuler l'existence d'éléments autres qu'anatomo-physiologiques
s'interdire d'avoir recours à la notion d'espace
jusqu'à ce qu'elle s'impose nécessaire ou qu'elle soit déduite

Emmanuel KANT, Critique de la raison pure :
Espace : forme de l'intuition, constitutive du sujet connaissant (versus *sensorium dei* selon Isaac NEWTON)
sensibilité <> intuition <> entendement

INTUITION SPATIALE :
ce qui fait que les choses nous "paraissent" +/- loin, à gauche, droite, haut, bas, devant, derrière

Ce qui fait que les choses "paraissent" +/- loin et la réaction d'orientation

La **réaction d'orientation** est un ensemble de contractions musculaires coordonnées qui conduit à orienter un (plusieurs) organe(s) sensoriel(s) vers l'endroit où se trouve un objet détecté.

→ un processus neurobiologique de "mesure" des distances auxquelles se trouvent les objets

La **réaction d'orientation** se manifeste par des modifications posturales et neurovégétatives :

- changements d'orientation des yeux, de la tête, voire même du corps
- vasoconstriction périphérique associée à une vasodilatation centrale
- changements des rythmes respiratoire et cardiaque
- changements des signaux EEG ("réveil" cortical)
- changement de conductivité de la peau (réponse électrodermale)
- arrêt des actions en cours

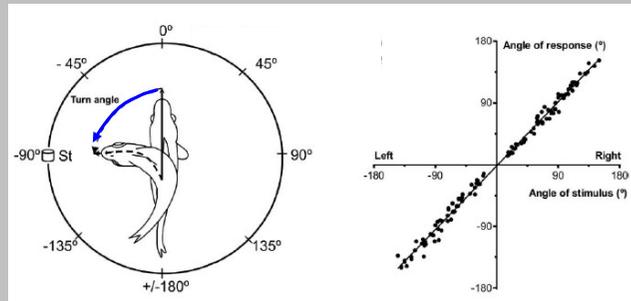
Variabilité morphologique et Invariants fonctionnels

Malgré des **différences** morphologiques et fonctionnelles dans les organes sensoriels (rétine, cochlée, bulbe olfactif, etc.) et moteurs (muscles extra-oculaires, muscles du cou, etc.) mis en œuvre, certaines **régularités** (intra- et inter-spécifiques) apparaissent dans la réaction d'orientation.

Régularité temporelle : la réaction d'orientation est toujours extrêmement rapide (saccade), même suite à une paralysie de l'appareil oculomoteur (saccade de la tête).

Régularité spatiale : les propriétés métriques de la réaction d'orientation sont conformes à l'étendue de l'environnement, avec une variabilité relativement bien délimitée.

Orientation rapide du corps chez le Poisson

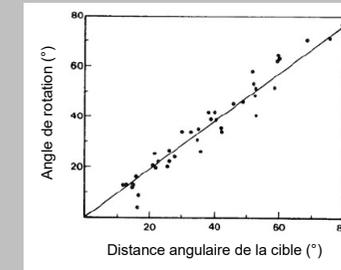


Torres et al. *Brain Research Bulletin* 2005

Orientation saccadique de la tête chez la Salamandre

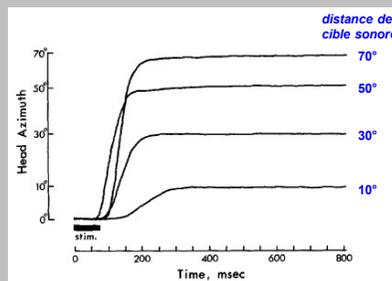


Schülert & Dicke *Journal of Experimental Biology* 2002



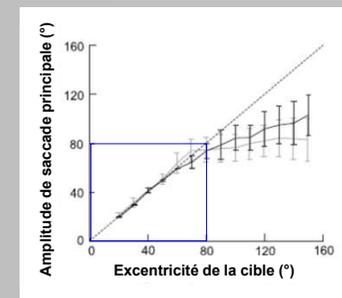
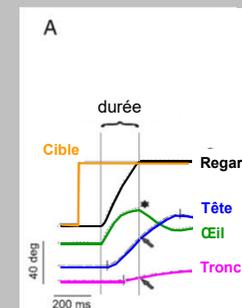
Werner & Himstedt
Zool. Jb. Physiol. 1985

Orientation saccadique de la tête chez la Chouette



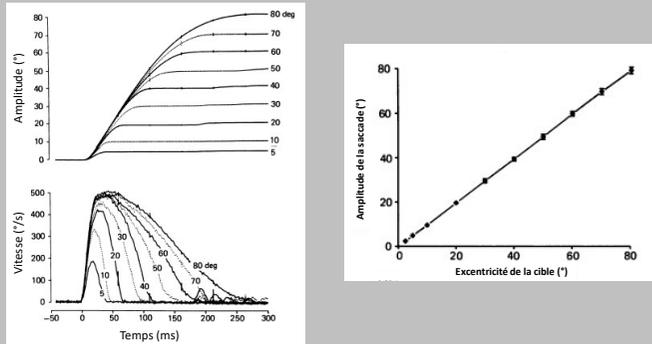
Knudsen, Blasdel & Konishi *Journal of Comparative Physiology* 1979

Orientation saccadique du regard chez le Singe Macaque



McCluskey & Cullen *Journal of Neurophysiology* 2007

Saccades oculaires chez l'Humain

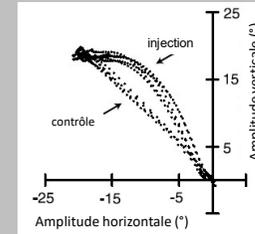


Collewijn et al. *Journal of Physiology* 1988

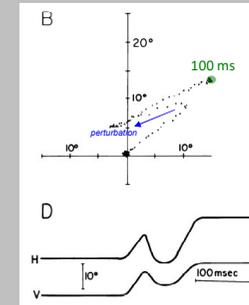
Robustesse : précision préservée même lors de perturbations expérimentales

Inactivation pharmacologique
(Formation réticulée pontine)

Brève microstimulation électrique
(Colliculus Supérieur profond)



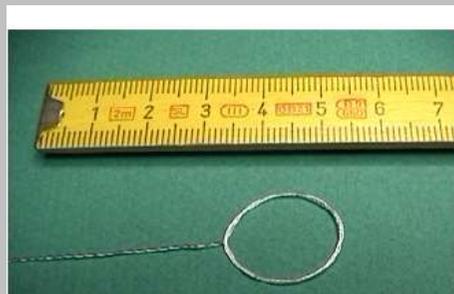
Barton, Nelson, Gandhi & Sparks
Journal of Neurophysiology 2003



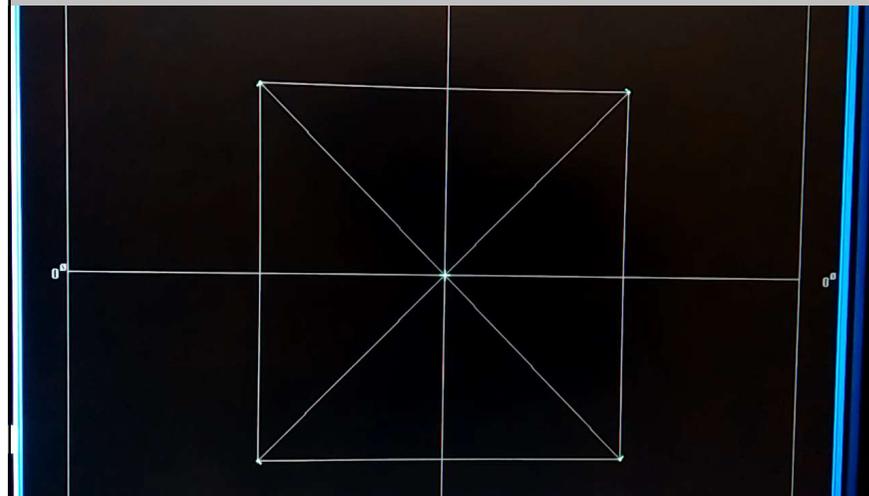
Sparks & Mays *Journal of Neurophysiology* 1983

Enregistrement des mouvements oculaires

- Induction électro-magnétique
- Bobine sclérale
- 2 champs magnétiques : H et V



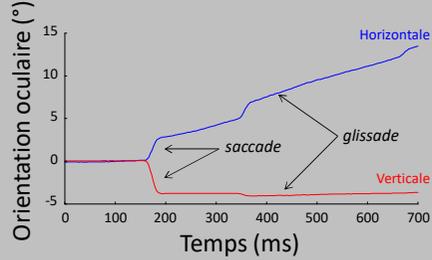
FILM MONTRANT LE REGARD POURSUIVANT UNE CIBLE MOBILE



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

rapide : saccade
lente : glissade

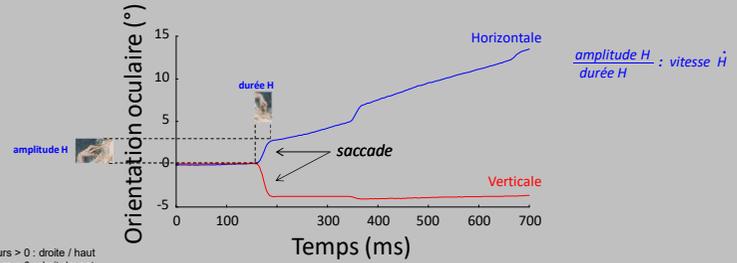
même muscles et noyaux moteurs MAIS populations cérébrales largement distinctes
deux commandes prémotrices : PHASIQUE et TONIQUE



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

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

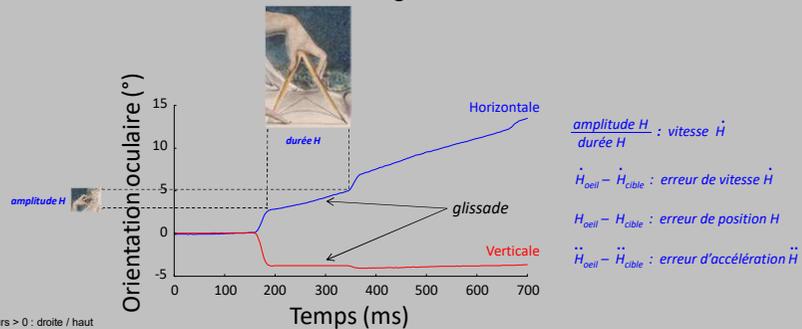
rapide : saccade
lente : glissade



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

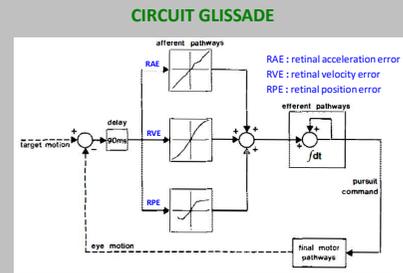
Deux types de mouvement oculaire en réponse au mouvement d'une cible visuelle

rapide : saccade
lente : glissade

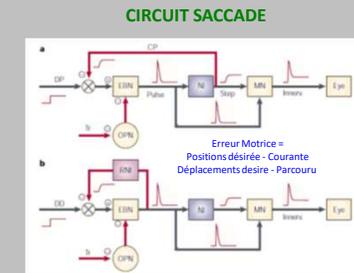


valeurs > 0 : droite / haut
valeurs = 0 : droit devant
valeurs < 0 : gauche / bas

Grandeurs physiques et arithmétique dans le cerveau ?



Lisberger, Morris & Tychsen Annual Review of Neuroscience 1987



Sparks Nature Neuroscience Reviews 2002

Grandeurs physiques et arithmétique dans le cerveau ?

**REMISE EN QUESTION :
ISOMORPHISME CERVEAU - MODELE "CINEMATIQUE"**

Mesures cinématiques (espace / temps)

comportement

Erreur de position

Erreur de vitesse

Erreur accel.

modèle cinématique

cerveau

Le fait que nous mesurons et modélisons le mouvement des globes oculaires ou de la tête (corps rigides) avec des notions cinématiques n'implique pas nécessairement une équivalence dans le cerveau, et notamment que l'activité des neurones doivent "encoder" (i.e., émettre des signaux liés à) l'amplitude, la vitesse ou l'accélération du mouvement.

SPACE-TIME REPRESENTATION IN THE BRAIN. THE CEREBELLUM AS A PREDICTIVE SPACE-TIME METRIC TENSOR

A. PELLISSON and R. LINAŠ
Department of Physiology and Biophysics, New York University Medical Center,
550 First Avenue, New York, NY 10016, U.S.A.

Understanding of brain function is often limited by the tacit acceptance of concepts known to be basically inappropriate. An example is the tenet that the brain, in its internal workings, utilizes space-time reference frames similar to those used in classical mechanics.

However, the utilization of separate systems of coordinates for space and time hinges upon the concept of simultaneity. Since within the brain there is no 'instantaneous' simultaneity agent comparable to the light, the classical usage of separate space and time coordinates is inapplicable in the case of describing the inner workings of the CNS.

Neuroscience 1982

La compréhension de la fonction cérébrale est souvent limitée par l'acceptation tacite de concepts connus pour être fondamentalement inappropriés. Un exemple est le principe selon lequel le cerveau, dans son fonctionnement interne, utilise des cadres de référence spatio-temporels similaires à ceux utilisés en mécanique classique.

Or l'utilisation de systèmes de coordonnées séparés pour l'espace et le temps repose sur le concept de simultanéité. Puisque dans le cerveau il n'y a pas agent de simultanéité instantanée comparable à la lumière, l'utilisation classique de coordonnées séparées de type espace et temps est inapplicable à la description du fonctionnement interne du SNC.

CHAPITRE 15
Laurent GOFFART¹

De la représentation cérébrale spatio-temporellement distribuée à la capture ici et maintenant d'un objet visuel en mouvement²

L'avenir de la complexité et du désordre.
J.-C. S. Levy & S. Olman (Eds) pp 267-294, 2018
Editions matériologiques
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02296340>

Grandeurs physiques et arithmétique dans le cerveau ?

**REMISE EN QUESTION :
ISOMORPHISME CERVEAU - MODELE CINEMATIQUE**

Mesures cinématiques (espace / temps)

comportement

Erreur de position

Erreur de vitesse

Erreur accel.

modèle cinématique

cerveau

Equilibre

Symétrie brisée

Restauration

modèle

Mesures intrinsèques (réseaux / temps)

PHYSIOLOGIE

Est-il possible d'étudier la neurophysiologie des mouvements visuellement-guidés sans plonger dans le fonctionnement cérébral des notions de la mécanique classique ?

Théorie alternative

Pas de mouvement = équilibre de commandes
 Démarrage du mouvement = symétrie brisée
 Saccade = restauration de l'équilibre
 Glissement = déséquilibre maintenu et contrôlé

J. Neurophysiol. 120, 3234-3245, 2018.
First published October 21, 2018; doi:10.1152/jn.00402.2018.

REVIEW | The Role of Eye Movements in Perception, Cognition, and Action

Neurophysiology of visually guided eye movements: critical review and alternative viewpoint

© Laurent Goffart,^{1,2} Clara Bourrelly,¹ and Jean-Charles Quinton¹
¹Aix Marseille University, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Neurosciences de la Timone, Marseille, France; ²Aix Marseille University, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre Gilles Guérin Granger, Aix-en-Provence, France; and ³Université Grenoble Alpes, Centre National de la Recherche Scientifique, Laboratoire Jean Karamé, Grenoble, France

Journal of Neurophysiology vol. 120, pp 3234-3245, 2018

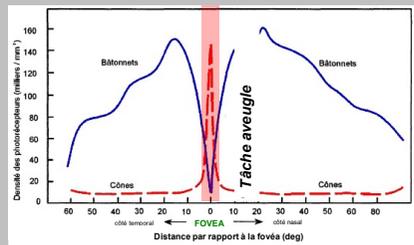
Kinematics and the neurophysiological study of visually-guided eye movements

Laurent Goffart et al.^{1,2,3*}

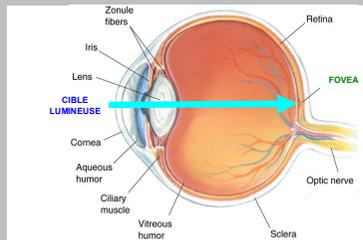
¹Aix Marseille University, CNRS, INSU, Institut de Neurosciences de la Timone, Marseille, France
²Aix Marseille University, CNRS, CCGG, Centre Gilles Guérin Granger, Aix-en-Provence, France
³Corresponding author: Tel.: +33 491324052, e-mail address: laurent.goffart@univ-amu.fr

Progress in Brain Research, vol. 248, pp 375-384, 2019

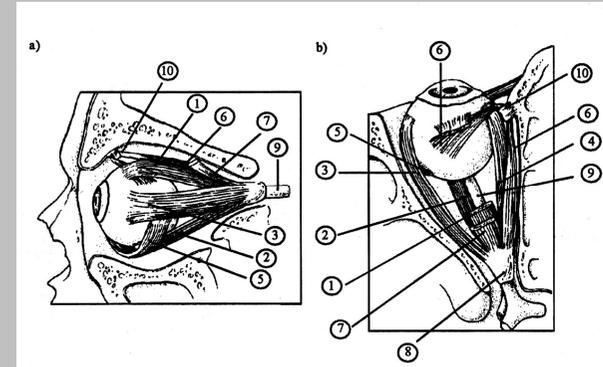
Regarder une cible visuelle



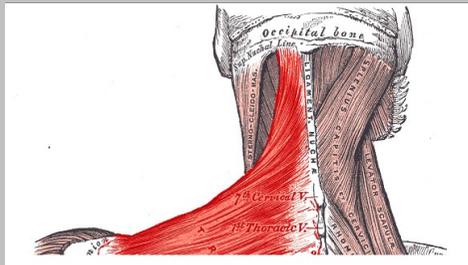
Rétine inhomogène



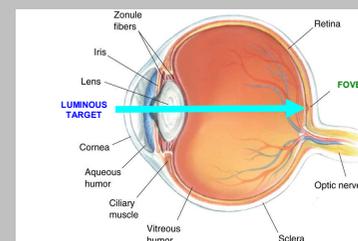
Cible projetée sur la fovéa ↔ contraction appropriée des muscles extraoculaires (direction du regard)

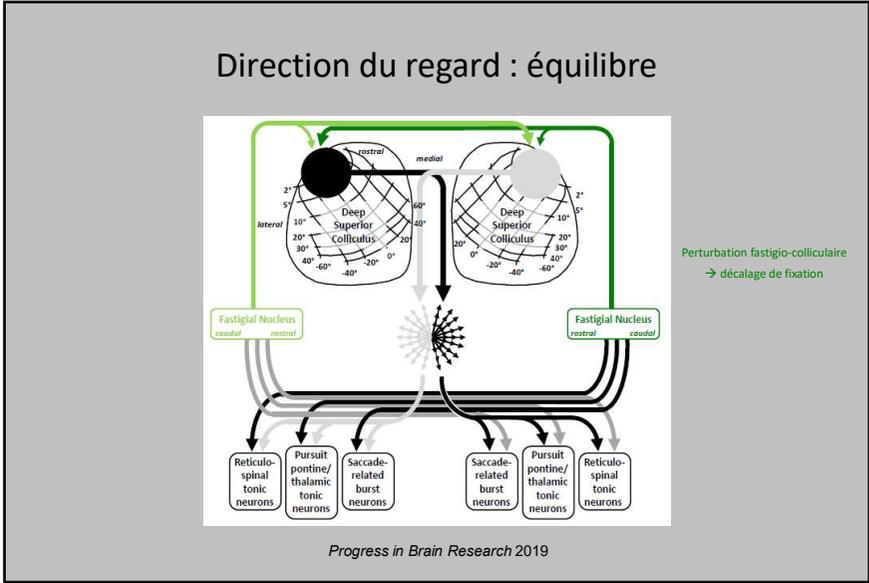
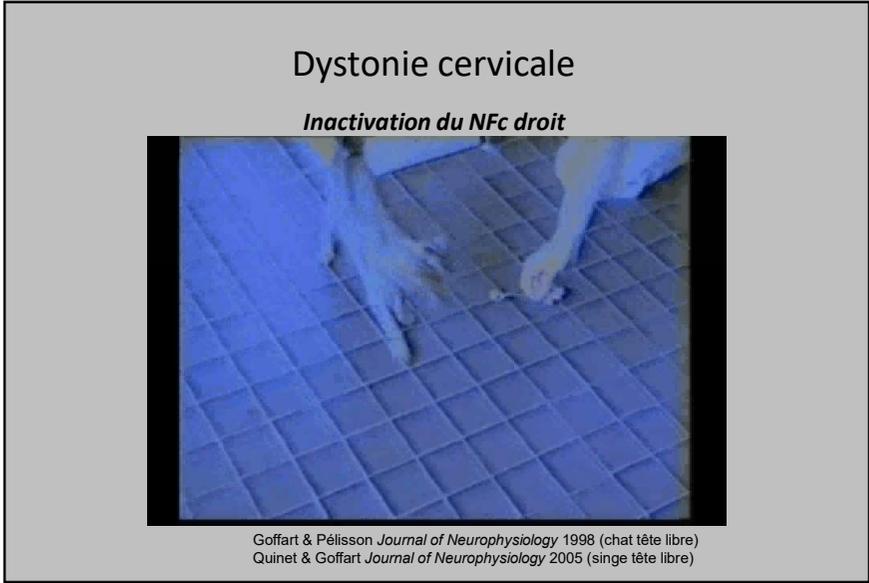
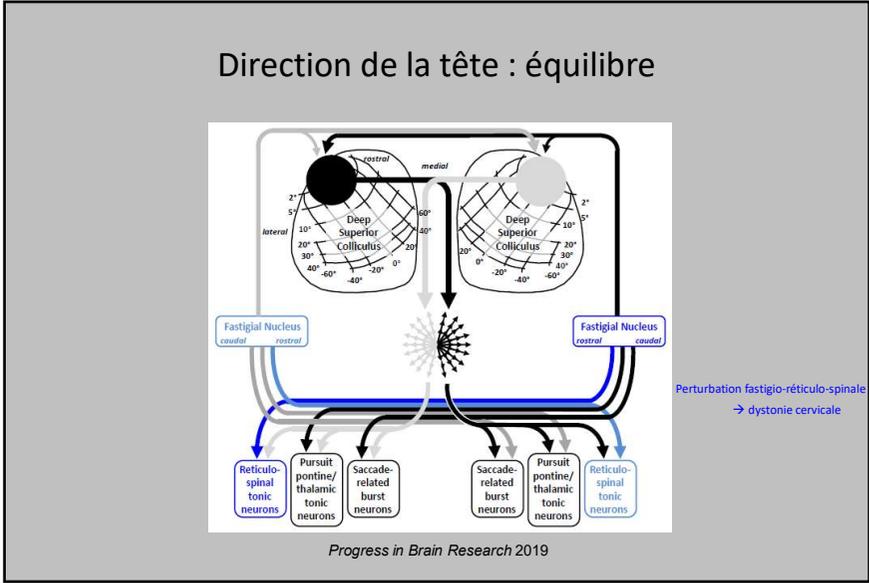
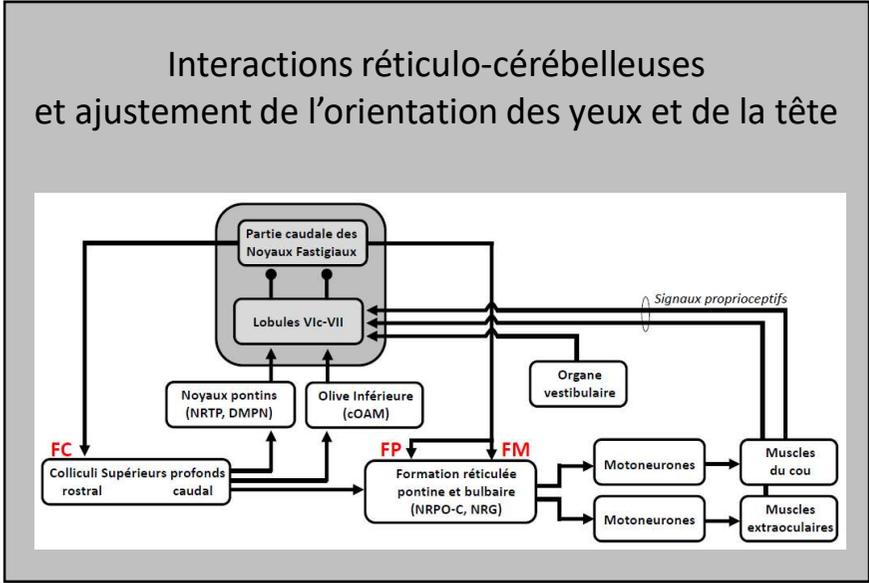


Cible projetée sur la fovéa ↔ contraction appropriée des muscles nucaux (direction de la tête)

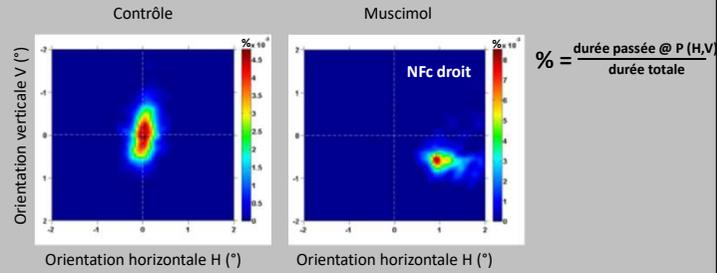


Regarder une cible visuelle, C'EST contracter une multitude de muscles



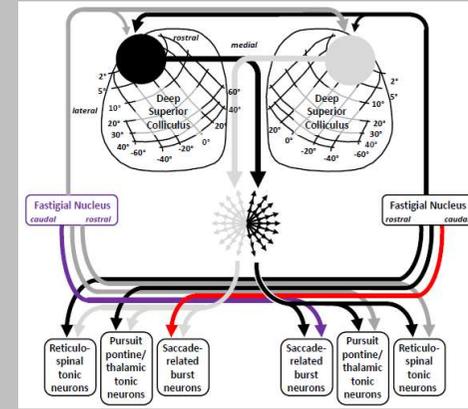


Décalage de fixation visuelle chez le singe



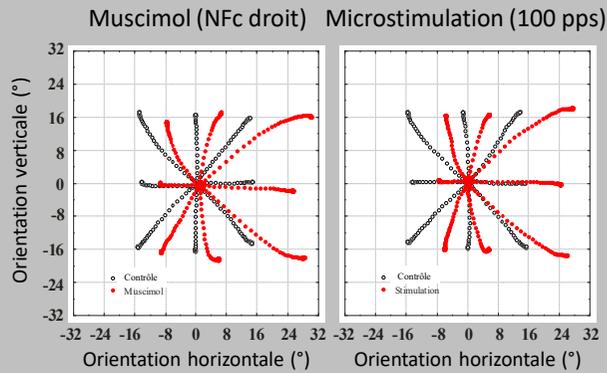
$$\% = \frac{\text{durée passée @ P (H,V)}}{\text{durée totale}}$$

Saccade : restauration d'équilibre

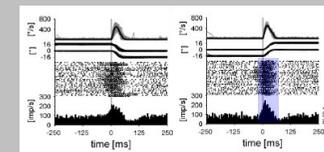
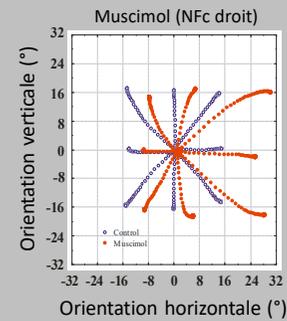


Progress in Brain Research 2019

Dysmétrie des saccades pendant inhibition Nfc



Dysmétrie de la composante horizontale due à la suppression de la rafale intra-saccadique



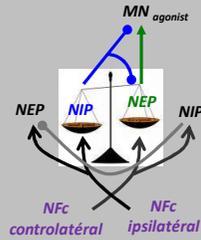
modifié de Kleine, Guan & Büttner J Neurophysiol 2003

Saccade horizontale : restauration d'équilibre sous contrôle fastigial

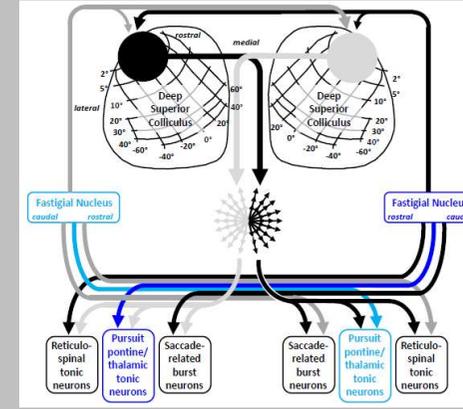
J. Neurophysiol. 92: 3351-3367, 2004.
First published June 30, 2004; doi:10.1152/jn.01199.2003.

Deficits in Saccades and Fixation During Muscimol Inactivation of the Caudal Fastigial Nucleus in the Rhesus Monkey

Pour chaque saccade (horizontale, oblique ou verticale),
Les Nfc gauche et droit régulent la balance d'activité
entre les signaux excitateurs (NEP) et inhibiteurs (NIP)
adressés aux neurones moteurs et internéuraux du noyau abducens
(Goffart, Chen & Sparks *Journal of Neurophysiology* 2004).

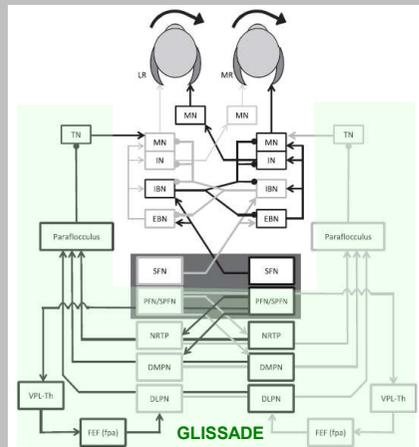


Extension de l'hypothèse bilatérale à la poursuite (déséquilibre soutenu)



Progress in Brain Research 2019

Extension de l'hypothèse bilatérale à la poursuite (déséquilibre soutenu)

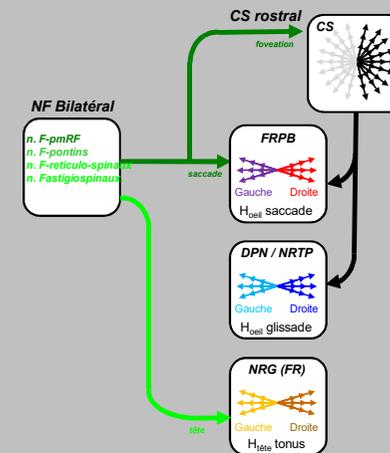


Perturbation Nfc → poursuite ralentie

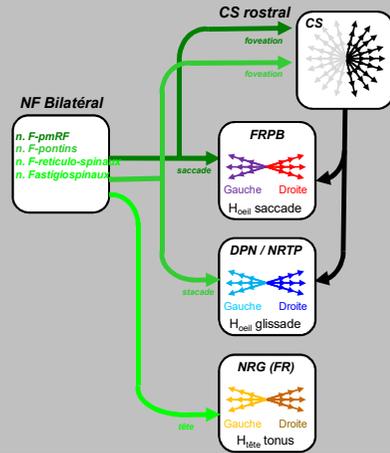
Pas d'altération de la latence de la glissade
(démarrage dû à l'asymétrie bilatérale
de l'activité des NOT)

Bourrelly, Quinet & Goffart
Journal of Neurophysiology 2018

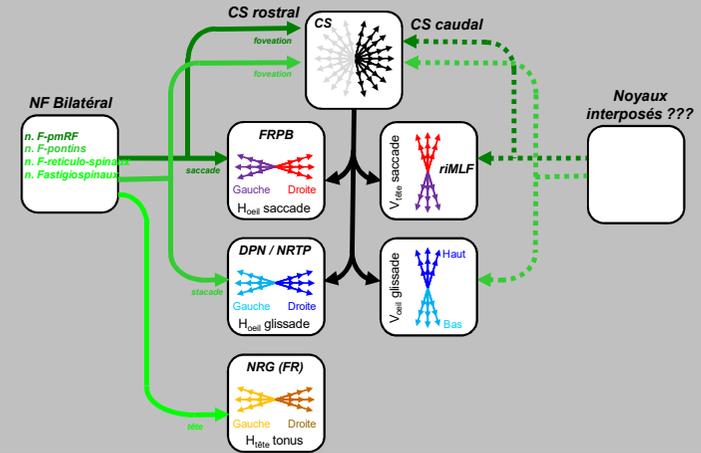
résumé : Hypothèse bilatérale



résumé : Hypothèse bilatérale

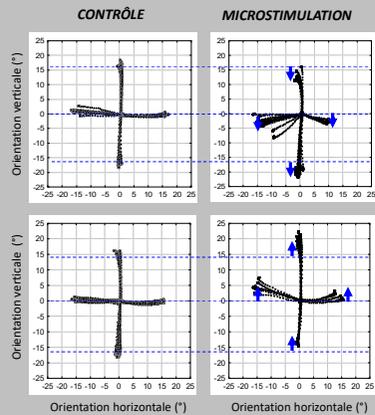


résumé : Hypothèse bilatérale



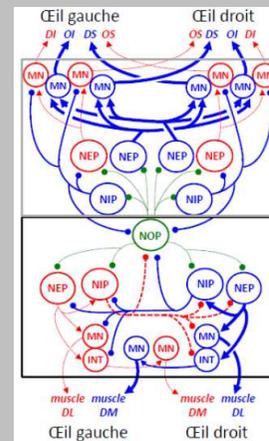
Dysmétrie de la composante verticale

Microstimulation en dehors de la Région fastigiale oculomotrice (Hor)

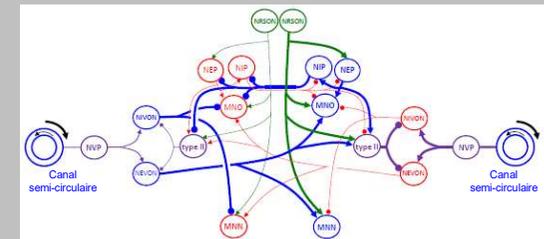


Théorie neurophysiologique

Couplage Hor. / Vertical



Couplage oculo-céphalique



Goffart HDR 2019; en préparation

Itinéraire

ROOM TILT ILLUSION



Sierra-Hidalgo et al. J. Neurology 2012

- 1983** : découverte de la Critique de la raison pure d'Emmanuel Kant (espace et temps)
1984 : cursus d'études de Psychologie, Université de Lille 3
1987 : découverte des travaux de Schiller & Stryker (1972) chez le singe
1989 : **maîtrise de Psychologie expérimentale**, Université de Lille 3
 → travail expérimental chez le sujet humain au laboratoire de Psychophysiologie (dir: **Jean-Marie Coquery**) sous la direction de Jacques Honoré (CNRS) :
influence de la direction regard sur la facilitation cutanée du réflexe de Hofmann
1990 : **maîtrise de Physiologie**, Université de Lille 1
1991-1995 : recherche doctorale à INSERM u534 Vision & Motricité (dir: **Marc Jeannerod**)
 → travail expérimental chez le chat sous la direction de Denis Pélisson :
rôle du noyau prepositus hypoglossi dans l'orientation du regard chez le CHAT
1992 : découverte de Pellionisz & Llinas (1982)
 → changement de cap pour la thèse doctorale
rôle du noyau fastigial caudal dans l'orientation du regard chez le CHAT
1994 : rencontre avec **Albert Fuchs**, University of Washington, Seattle, USA
 → stage d'apprentissage de l'électrophysiologie cérébelleuse
1996 : **doctorat de Neurosciences**, Université Claude Bernard Lyon 1
1995-1999 : travail post-doctoral au laboratoire de **David Sparks**, Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, USA
 puis au Baylor College of Medicine, Houston, USA
 → apprentissage de l'approche neurophysiologique chez le singe macaque
rôle du noyau fastigial caudal dans l'orientation du regard chez le SINGE

Itinéraire (fin)

- 1999-2004** : chargé de recherche CNRS à INSERM u534 Espace & Action, Bron (dir: C. Prablanc/D. Pélisson)
2004-2011 : chargé de recherche CNRS à INCM, Marseille (dir: D. Bousssaoud)
2011-2020 : chargé de recherche CNRS à INT, Marseille (dir: G. Masson)

Mobilités géographiques depuis 1999 :

- | | |
|--|--|
| 1. Salk Institute for Biological Studies, San Diego, USA | → Richard Krauzlis |
| 2. Institut für Biologie, Freiburg, Allemagne | → Samuel Rossetl Travaux sur |
| 3. Dept of Biology, Kyushu University, Fukuoka, Japon | → Yoshifumi Yamawaki <i>mantis religiosa</i> |
| 4. Dept of Physiology, Hokkaido Univ. School of Medicine, Sapporo, Japon | → Kikuro Fukushima |
| 5. Dept of Bioengineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, USA | → Neeraj Gandhi |

Encadrements doctoraux :

- | | |
|---------------------------|---|
| Julie Quinet | → Rochester University, University of Mississippi, University of Alabama, USA |
| Lorenzo Guerrasio | → industrie automobile (IA), Allemagne |
| Jerome Fleuriet | → University of Washington, USA |
| Clara Bourrelly | → University of Pittsburgh, USA |
| Nicolas Orlando-Dessaints | → formation en cours |

Enseignements :

- | | |
|---|---|
| Aix-Marseille Université, Master 1 Neurosciences, AMU | → Neurophysiologie de l'orientation du regard |
| Aix-Marseille Université, L3 Médecine, AMU | → Neurophysiologie de la motricité oculaire |

Remerciements

- | | | |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Ulrich Büttner, PhD | Albert Fuchs, PhD | Richard Krauzlis, PhD |
| Patrick Cavanagh, PhD | Kikuro Fukushima, PhD | Igor Ly, PhD |
| Jean-Marie Coquery, PhD | Neeraj Gandhi, PhD | Kathy Pearson |
| Longtang Lewis Chen, PhD | Ziad Hafed, PhD | David Sparks, PhD |
| Gabriella Crocco, PhD | Rimas Kalesnykas, PhD | Yoshifumi Yamawaki, PhD |

Human Frontier Science Program



cnrs



So years of building new worlds through knowledge



FONDATION RECHERCHE MÉDICALE

Fondation de France



ANR

Agence Nationale de la Recherche



erc

European Research Council