

PHILOSOPHER AU QUOTIDIEN

CRITIQUE DE LA CÉRÉBRALISATION DES NOMBRES ET DES NOTIONS DE MÉCANIQUE CLASSIQUE





Selon certaines études contemporaines, l'activité cérébrale véhiculerait des signaux internes correspondant à des notions cinématiques ou aux nombres d'éléments dans le champ visuel. Dans sa présentation, l'auteur exposera une analyse critique des preuves qu'elles avancent.

Par **Laurent Goffart**, neurophysiologiste expert de la motricité oculaire et doctorant en philosophie.

En collaboration avec le Centre Gilles Gaston Granger (AMU).

SAMEDI 2 DÉCEMBRE 2023
> 14H30, AUDITORIUM

ALCAZAR / 58 cours Belsunce 13001 Marseille / 04 91 55 90 00

**Bibliothèque Alcazar
Marseille
2 décembre 2023**

Critique de la cérébralisation des nombres et des notions de mécanique classique

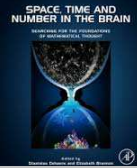
Laurent Goffart

Confusions

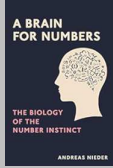
Au cours des dernières décennies, une **confusion** s'est installée dans les sciences du cerveau entre

- les concepts
- les mesures (et leurs transformations numériques) et
- les processus physiologiques qui engendrent le phénomène mesuré.


Les notions théoriques associées à certaines mesures ont conduit certains auteurs à imaginer des options telles que celles d'un **codage dans le cerveau** 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.




2011




2019



2004



2000



2007

Les mouvements des yeux pour sonder "l'espace, le temps et les nombres" dans le cerveau

Compression of visual space before saccades

John Ross¹, M. Concetta Morrone¹ & David C. Burr^{1,2}

Nature 1997

Saccadic eye movements cause compression of time as well as space

M Concetta Morrone¹, John Ross² & David Burr^{3,4}

Nature Neuroscience 2005

Saccades compress space, time and number

David C. Burr^{1,2,3}, John Ross³, Paola Binda^{4,5} and M. Concetta Morrone^{6,7}

Trends in Cognitive Sciences 2010

Correspondences

Eye position predicts what number you have in mind

Tobias Loetscher^{1,2}, Christopher J. Bockisch^{3,4}, Michael E.R. Nicholls¹ and Peter Brugger⁴

Current Biology 2010

Recruitment of an Area Involved in Eye Movements During Mental Arithmetic

André Knops^{1,2,3}, Bertrand Thirion^{2,4}, Edward M. Hubbard^{1,2,3}, Vincent Michel^{2,3,4}, Stanislas Dehaene^{1,2,3,5}

Science 2009

Confusions

Au cours des dernières décennies, une **confusion** s'est installée dans les sciences du cerveau entre

- les concepts
- les mesures (et leurs transformations numériques) et
- les processus physiologiques qui engendrent le phénomène mesuré.

Les notions théoriques associées à certaines mesures ont conduit certains auteurs à imaginer des options telles que celles d'un **codage dans le cerveau** 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.

Dans l'étude des processus mis en jeu dans la production des mouvements oculaires, certains auteurs ont imaginé que les paramètres cinématiques seraient « codés » dans l'activité des neurones. Pendant qu'ils émettent des potentiels d'action, les neurones « parleraient un langage codé » traduisible avec des notions de mécanique classique.

Pourtant, le mouvement des globes oculaires est la mesure de leur changement d'orientation physique, lequel est provoqué par un changement dans la contraction des muscles extra-oculaires, changement qui est lui-même sous le contrôle des groupes de neurones qui sont à l'origine des nerfs moteurs, lesquels neurones sont influencés par multiples processus parallèles dans le cerveau.

À la série totalement ordonnée des valeurs numériques de positions oculaires (mesures) est associée une structure radicalement différente : une structure dynamique, d'abord difficile puis confluyente, dont les éléments sont spatialement distribués et dont les activités se chevauchent temporellement.

Entre les nerfs optiques et les nerfs moteurs oculaires

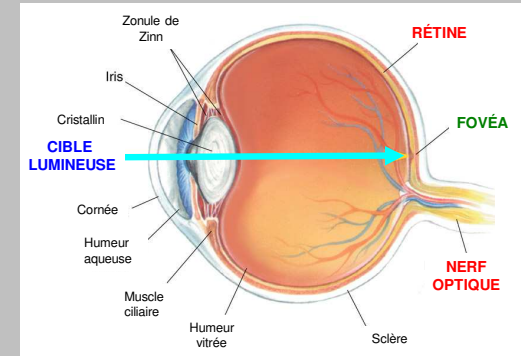
Prenons le cas d'un spot lumineux dans le champ visuel. Aux extrémités du nerf optique, l'excitation rétinienne déclenche des flux d'activité qui se manifestent dans le cerveau comme une sorte d'**explosion arborescente (diffluence)**. L'activité évoquée se propage spatialement distribuée dans de multiples foyers temporellement plus ou moins persistants.

A mesure que l'activité se propage et rejoint les groupes de cellules à l'origine des nerfs moteurs qui innervent les muscles extra-oculaires, cette **explosion** se transforme en une sorte de **compression (confluence)** dont la durée va déterminer la durée du mouvement et le recrutement de nouveaux groupes neuro-musculaires son ampleur.

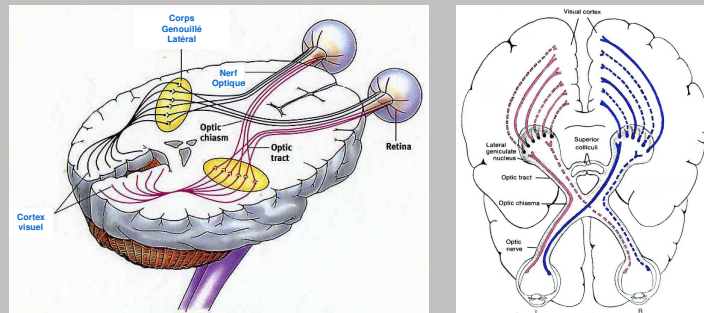
Alors que la trajectoire d'un corps **rigide** (œil ou objet) dans le monde physique peut être mathématiquement décrite comme une courbe sans épaisseur, son corrélat cérébral est "spatialement" et "temporellement" différent : il est **diffusif et élastique**.

L'œil

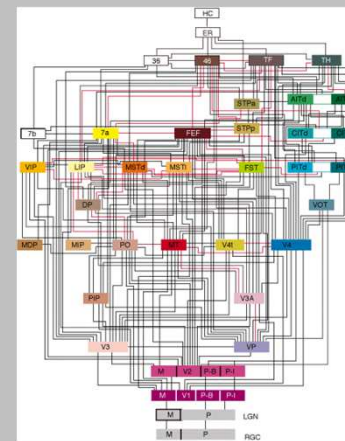
coupe sagittale



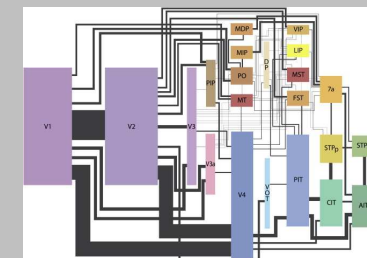
Au bout du nerf optique



Explosion des signaux visuels: diffluence spatiale et temporelle

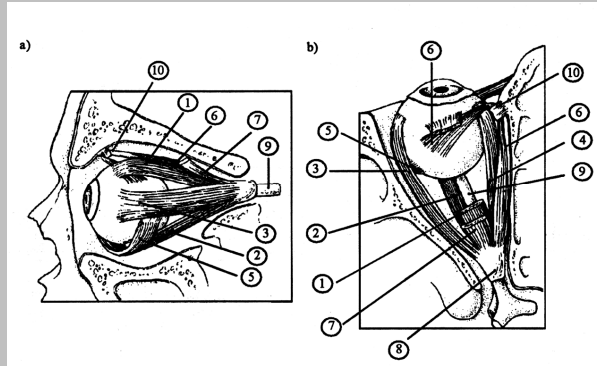


Felleman & Van Essen *Cerebral Cortex* 1991

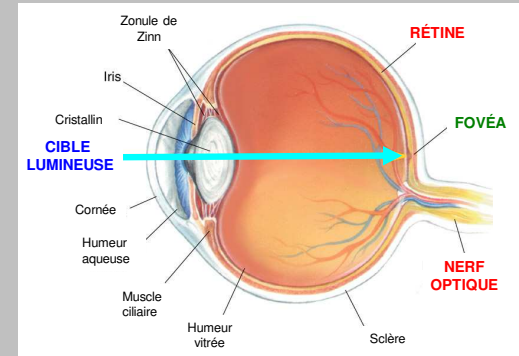


Wallisch & Movshon *Neuron* 2008

Mais l'œil n'est pas seulement une rétine

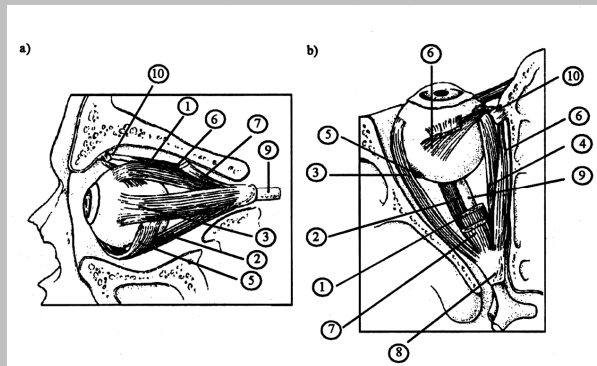


Projection de la cible sur la fovéa



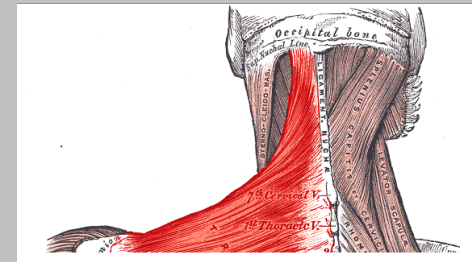
Projection de la cible sur la fovéa

SI & SSI contraction appropriée des muscles extraoculaires
(direction du regard)

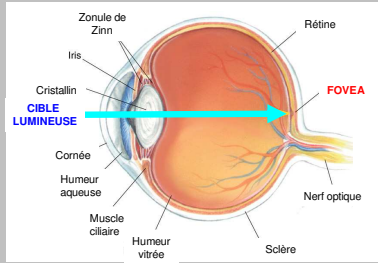


Projection de la cible sur la fovéa

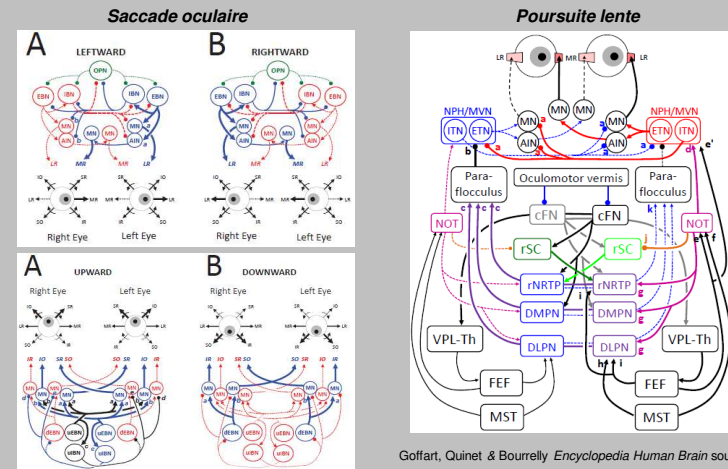
SI & SSI contraction appropriée des muscles du cou
(direction de la tête)



REGARDER UNE CIBLE =
contracter une multitude de muscles



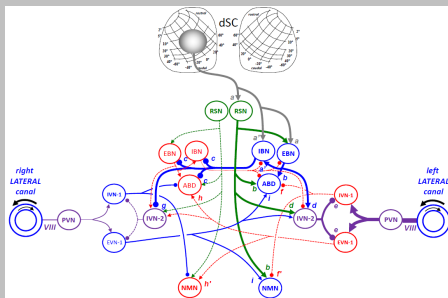
Confluence à l'origine des nerfs oculomoteurs



Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia Human Brain* soumis

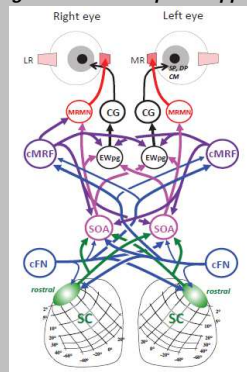
Confluence à l'origine des nerfs oculomoteurs

Orienter les yeux et la tête vers la gauche



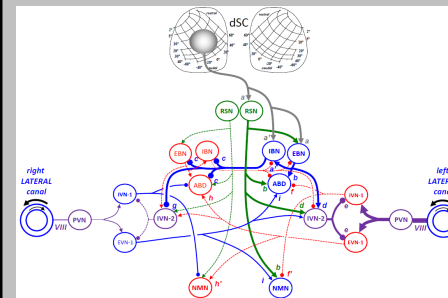
Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia Human Brain* soumis

Regarder une cible qui se rapproche



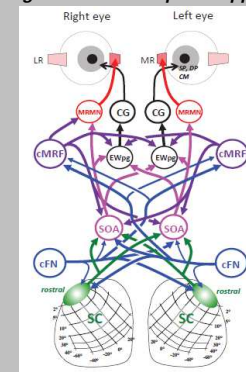
! CE SAVOIR N'A ETE ACQUIS
NI PAR LA **PSYCHOLOGIE**,
NI PAR L'**IMAGERIE CÉRÉBRALE**,
NI PAR LA **MODÉLISATION COMPUTATIONNELLE**,
MAIS PAR LA NEUROPHYSIOLOGIE ET L'EXPÉRIMENTATION ANIMALE **!**

Orienter les yeux et la tête vers la gauche



Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia Human Brain* soumis

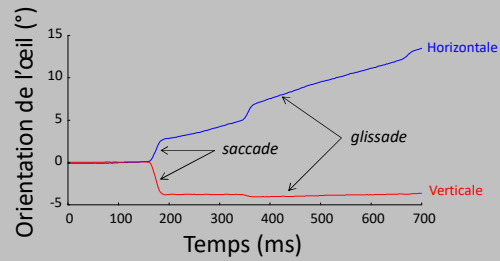
Regarder une cible qui se rapproche



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

rapide : saccade
lent : glissade

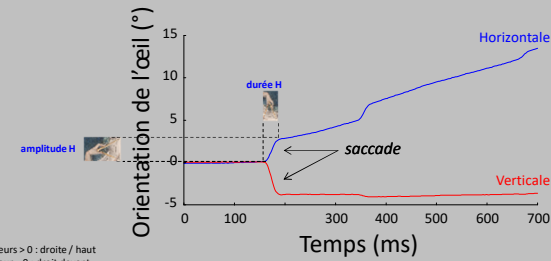
mêmes muscles mais réseaux neuronaux en amont largement distincts



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

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

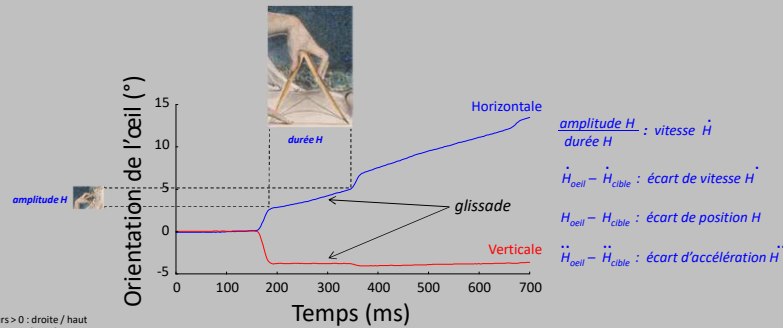
rapide : saccade
lent : glissade



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

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

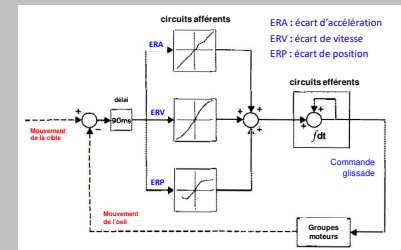
rapide : saccade
lent : glissade



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

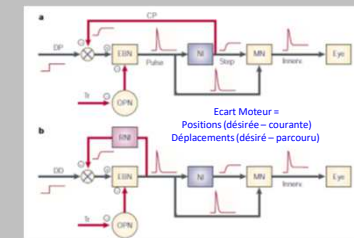
Grandeurs physiques et arithmétique dans le cerveau ?

CIRCUIT GLISSADE



Lisberger, Morris & Tychsen Annual Review of Neuroscience 1987

CIRCUIT SACCADÉ



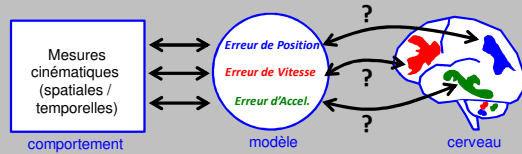
Sparks Nature Neuroscience Reviews 2002



Quantités physiques et arithmétique dans le cerveau ?

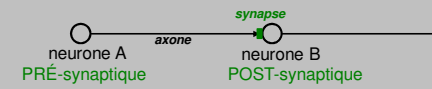
ISOMORPHISME CERVEAU - MODÈLE

REMIS EN QUESTION

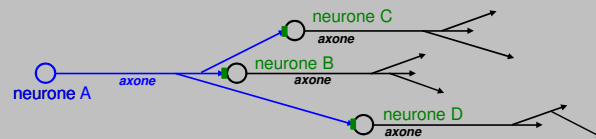


Mesurer et modéliser le mouvement du globe oculaire (corps rigide) avec des notions cinématiques n'implique pas une équivalence dans le cerveau, à savoir que l'activité des neurones "code" (c'est-à-dire *émette des signaux liés à*) l'amplitude, la vitesse ou l'accélération du mouvement de l'œil, et leur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

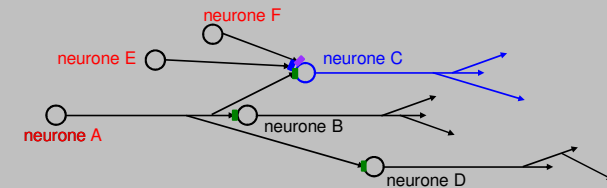
La synapse



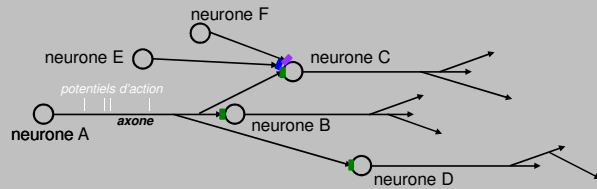
Chaque neurone (A) contacte plusieurs neurones POST-synaptiques (B, C et D)



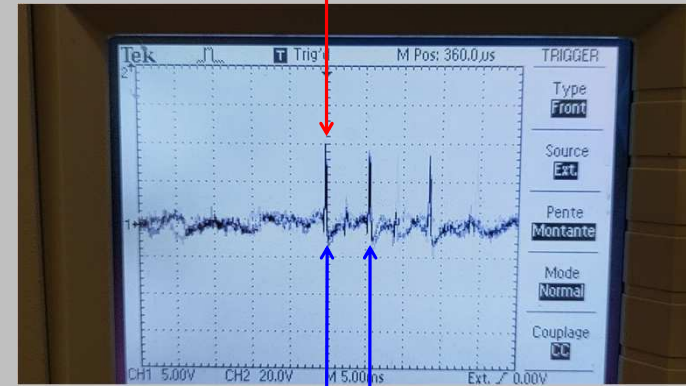
Chaque neurone (C) est contacté par plusieurs neurones PRÉ-synaptiques (A, E et F)



Les neurones émettent des potentiels d'action qui se propagent de long de l'axone



potentiel d'action 1 milliseconde (1/1000 seconde)



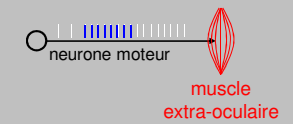
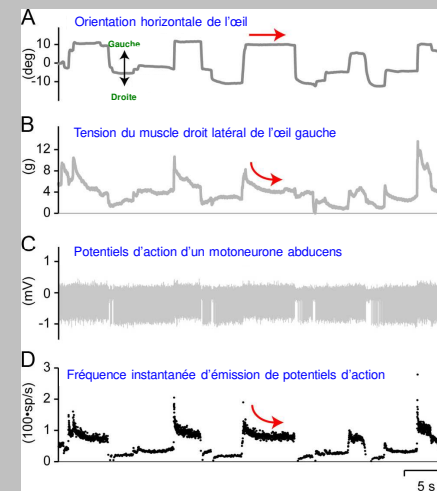
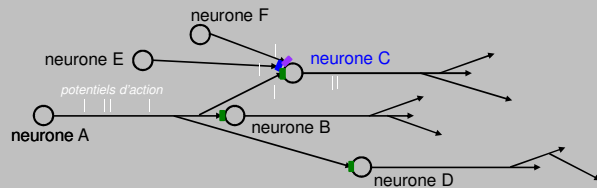
6 millisecondes

→ fréquence instantanée = 166
→ 166 potentiels d'action par seconde

La probabilité qu'un neurone (C) émette des potentiels d'action dépend de la quasi-simultanéité des potentiels pré-synaptiques (lorsque l'influence est excitatrice).

Il existe aussi des influences inhibitrices.

Elles rendent le neurone post-synaptique insensible aux excitations.

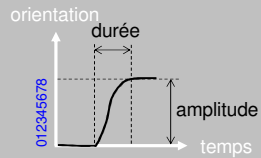
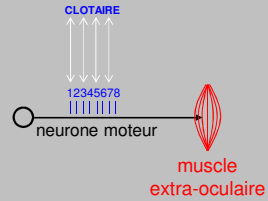


Davis-Lopez de Carrizosa et al. *Journal of Neuroscience* 2011

La probabilité qu'un neurone (C) émette des potentiels d'action dépend de la quasi-simultanéité des potentiels pré-synaptiques (lorsque l'influence est excitatrice).

Il existe aussi des influences inhibitrices.

Elles rendent le neurone post-synaptique insensible aux excitations.

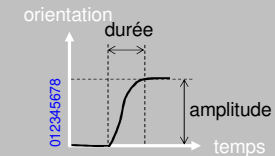
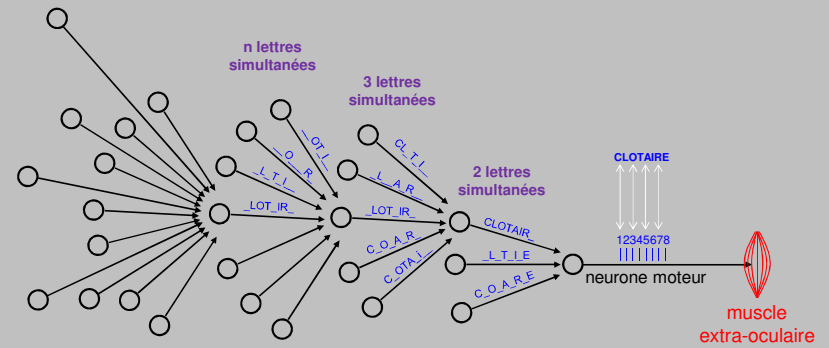
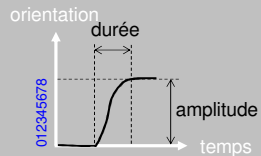
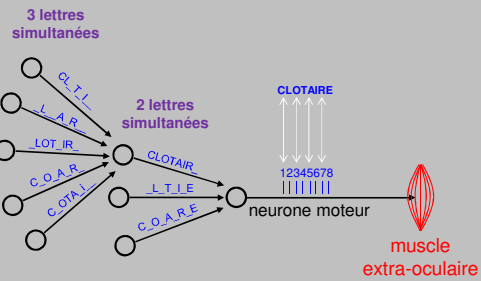
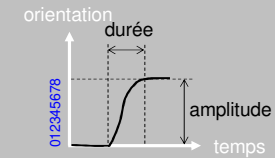
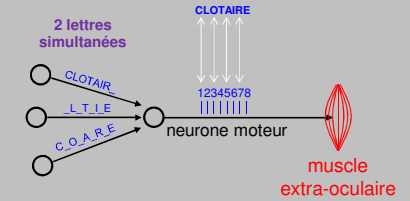


La sequence de potentiels d'action est la cause de la contraction musculaire, laquelle entraine la saccade oculaire

La probabilité qu'un neurone (C) émette des potentiels d'action dépend de la quasi-simultanéité des potentiels pré-synaptiques (lorsque l'influence est excitatrice).

Il existe aussi des influences inhibitrices.

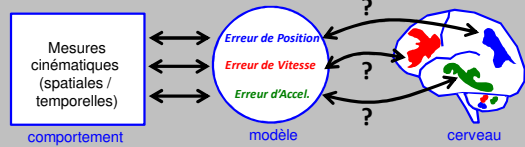
Elles rendent le neurone post-synaptique insensible aux excitations.





Quantités physiques et arithmétique dans le cerveau ?

ISOMORPHISME CERVEAU - MODÈLE REMIS EN QUESTION

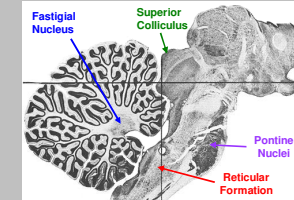
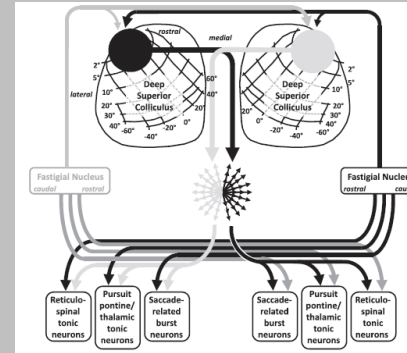


De remettre en question l'isomorphisme entre :

- le fonctionnement cérébral (discours neurophysiologique) et
- le modèle (discours cybernétique ou computationnel)

ne mène pas à une impasse.

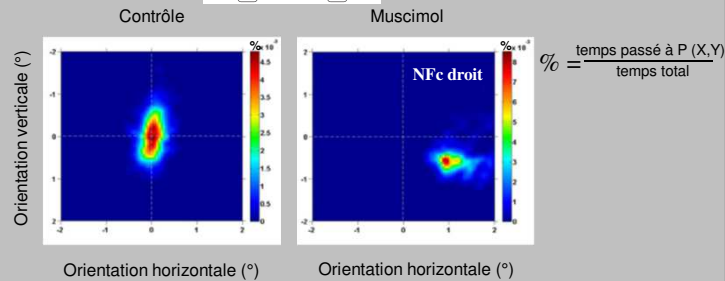
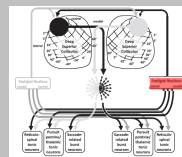
Poly-équilibre et restauration



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

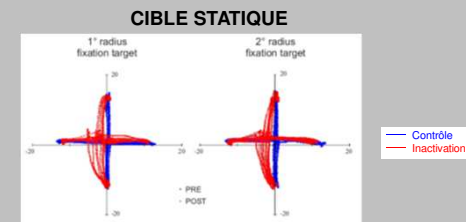
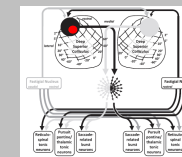
Direction du regard: un équilibre

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



Direction du regard: un équilibre

Inactivation unilatérale et réversible du **colliculus supérieur rostral** chez le singe macaque



Décalage de fixation
Saccades vers cibles périphériques précises

Cerveau et mathématiques

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."

Jean-Pierre Changeux (1989):

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

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 isomorphe 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."

Cerveau et mathématiques

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."

Jean-Pierre Changeux (1989):

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

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."

Helen De Cruz (2006):

"La philosophie des mathématiques n'a pas accordé beaucoup d'attention au contexte biologique des mathématiques, même si il va de soi que les mathématiciens sont des organismes biologiques et qu'ils produisent des théories et des pratiques mathématiques avec leur cerveau."

Culture et mathématiques

En réduisant l'esprit au cerveau, le développement intellectuel au développement cérébral, beaucoup auteurs ont confondu 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.

Fernand Doridot & Marco Panza 2004b

"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»."

Fernand Doridot & Marco Panza 2004a

"La constitution d'une théorie mathématique est un fait historique ... elle est l'affaire de quelques mathématiciens travaillant en conditions déterminées plutôt que la réalisation d'un processus cognitif propre à l'espèce. Et si, ..., il en est ainsi, alors seule l'histoire peut rendre compte de cette constitution et l'expliquer ... La constitution d'une théorie mathématique nous semble difficilement concevable autrement que comme un processus historique, tout au moins historiquement situé et déterminé"

Sylvain Auroux (1998)

Des structures cognitives sont externes à l'individu. Elles "dépendent d'instruments externes (livres, bibliothèques, instruments de calcul et d'observation, etc.) ainsi que de structures sociales de productions et de cumulation des connaissances (encyclopédies, sociétés savantes etc.) ... la connaissance est un processus tout à la fois matériel, social et collectif, jamais limité, enfermé, préservé ou produit par des compétences individuelles qui n'en concernent que des moments et des fragments"

Trends in Cognitive Sciences | **ColPress**

Review
The Evolutionary History of Brains for Numbers
Andreas Nieder^{1,*}
Trends in Cognitive Sciences 2021

Review
The Adaptive Value of Numerical Competence
Andreas Nieder^{1,*}
Trends in Ecology and Evolution 2020

Evolution of cognitive and neural solutions enabling numerosity judgements: lessons from primates and corvids
Andreas Nieder
Philosophical Trans/ Royal Soc. 2017

Letter
Number Faculty Is Rooted in Our Biological Heritage
Andreas Nieder^{1,*}
Trends in Cognitive Sciences 2017

The neuronal code for number
Andreas Nieder
Nature Reviews Neuroscience 2016

Coding of abstract quantity by 'number neurons' of the primate brain
Andreas Nieder
Journal of Comparative Physiology 2013

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 Tudusciuc and Andreas Nieder^{*}
PNAS 2007

Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex
Oana Tudusciuc and Andreas Nieder^{*}
PNAS 2007

→ Numerosity

Entre Q=2 et Q=3
 $\Delta(2,3) < 1$ pa/s
0,1 pa/100 ms
0,6 pa/600 ms

Entre Q=3 et Q=4
 $\Delta(3,4) < 2$ pa/s
0,2 pa/100 ms
1,2 pa/600 ms

Parmi la multitude de potentiels d'action qu'ils reçoivent d'autres neurones pendant 600 millisecondes, comment les neurones **post-synaptiques** font-ils pour distinguer le potentiel d'action émis par ce neurone et permettent au singe de produire une réponse différente selon qu'il y a 2, 3 ou 4 stimuli dans le champ visuel ?

Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex
Oana Tudusciuc and Andreas Nieder^{*}
PNAS 2007

→ Numerosity

Entre Q=2 et Q=3
 $\Delta(2,3) < 1$ pa/s
0,1 pa/100 ms
1 pa/600 ms

Entre Q=3 et Q=4
 $\Delta(3,4) < 2$ pa/s
0,2 pa/100 ms
1,2 pa/600 ms

Parmi la multitude de potentiels d'action qu'ils reçoivent d'autres neurones pendant 600 millisecondes, comment les neurones **post-synaptiques** font-ils pour distinguer les 1-3 potentiels d'action émis par ce neurone et permettent au singe de produire une réponse différente selon qu'il y a 2, 3 ou 4 stimuli dans le champ visuel ?

OPEN ACCESS Freely available online PLOS BIOLOGY

Monotonic Coding of Numerosity in Macaque Lateral Intraparietal Area

2007

Jamie D. Roitman^{1*}, Elizabeth M. Brannon^{2,3}, Michael L. Platt^{1,3}

1 Department of Neurobiology, Duke University, Durham, North Carolina, United States of America, 2 Department of Psychology and Neuroscience, Duke University, Durham, North Carolina, United States of America, 3 Center for Cognitive Neuroscience, Duke University, Durham, North Carolina, United States of America

Aire LIP

neurones "accumulateurs" neurones "décumulateurs"

Roitman, Brannon & Platt PLOS Biol 2007

Comment les neurones **post-synaptiques** font-ils pour distinguer si 4, 8 ou 16 stimuli ont été présentés dans le champ de réponse de ce neurone "comptable"?

A :
Pendant la tâche 32, les neurones post-synaptiques ne reçoivent pas de signal leur permettant de distinguer si 2-4-8 ou 16 stimuli furent présentés dans le champ de réponse du neurone enregistré.
Pendant la tâche 2, ils ne reçoivent pas de signal leur permettant de distinguer si 4, 8 ou 16 stimuli furent présentés

C :
Pendant la tâche 8, les neurones post-synaptiques ne reçoivent pas de signal leur permettant de distinguer si 8-16 ou 32 stimuli furent présentés dans le champ de réponse du neurone enregistré. Ils ne reçoivent pas non plus de signal leur permettant de distinguer si 2 ou 4 stimuli furent présentés.
Pendant la tâche 4, ils ne reçoivent pas de signal leur permettant de distinguer si 8 versus 16 (ou 2 vs 4) stimuli furent présentés.

Comment les neurones **post-synaptiques** font-ils pour distinguer si 8, 16 ou 32 stimuli ont été présentés dans le champ de réponse de ce neurone "comptable"?
 Comment font-ils pour distinguer si 2 ou 4 stimuli ont été présentés?

Roitman, Brannon & Platt PLOS Biol 2007

Aire LIP

neurones "accumulateurs" neurones "décumulateurs"

Roitman, Brannon & Platt PLOS Biol 2007

Population de 14 neurones "accumulateurs"

Population de 17 neurones "décumulateurs"

Il faut attendre 400 ms pour discerner les courbes.

Les neurones post-synaptiques ne reçoivent des signaux distincts que si ils accumulent le nombre de potentiels d'action des neurones de LIP pendant 400 ms

à condition que les potentiels d'action qu'ils reçoivent d'autres neurones ne viennent pas brouiller l'intégration.

Comment les neurones **post-synaptiques** font-ils pour distinguer les potentiels d'action émis par les neurones "comptables" (LIP) de ceux émis par une multitude d'autres neurones ?

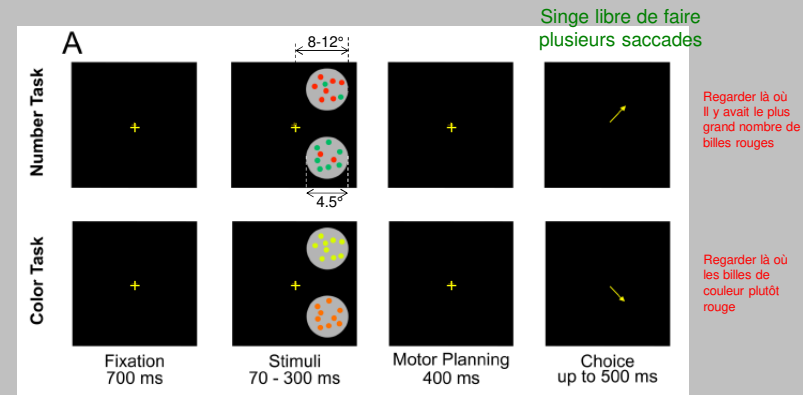
Une corrélation entre la cadence d'émission des potentiels d'action et un événement externe (nombre d'éléments dans le champ visuel) n'implique pas nécessairement que les potentiels d'action contribuent à la réponse comportementale.

Pharmacological inactivation does not support a unique causal role for intraparietal sulcus in the discrimination of visual number

Nicholas K. DeWind^{1*}, Jiyun Peng², Andrew Luo³, Elizabeth M. Brannon¹, Michael L. Platt^{1,4,5}

PLOS One 2017

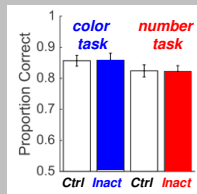
Tâches de discrimination



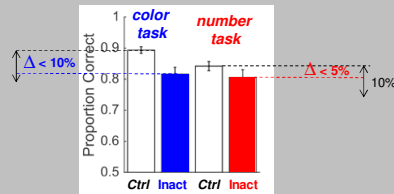
DeWind, Peng, Luo, Brannon & Platt PLOS One 2017

LIP ne participe pas non plus à la "comptabilité" visuelle

Inactivation de VIP



Inactivation de LIP



DeWind, Peng, Luo, Brannon & Platt PLOS One 2017

Pas d'effet → réfutation de l'hypothèse d'Andreas Nieder

Logique fallacieuse

Selon DeWind, Peng, Luo, Brannon & Platt (2017),

SI les aires LIP et VIP sont spécialisées dans le traitement du nombre d'items visuels, **ALORS** l'inactivation de l'une ou de l'autre de ces aires devrait provoquer un plus grand déficit dans une tâche de distinction numérique que dans une tâche de distinction de couleurs.
→ Nous avons vu que ce n'est pas le cas

Au lieu de rejeter leur prémisses, c'est-à-dire au lieu de conclure que les aires LIP et VIP ne jouent aucun rôle dans le traitement du nombre d'items visuels, ils enchainent sur une autre inférence :

SI l'inactivation entraîne des déficits similaires dans les deux tâches (numérique et couleurs) **ALORS** le traitement numérique dans ces aires LIP et VIP n'est que la signature d'un circuit à usage général pour la comparaison ordinale, l'attention visuelle ou la prise de décision perceptive



Surenchère cognitiviste :

- comparaison ordinale,
- attention visuelle
- prise de décision perceptive

