



HAL
open science

Critique de la cérébralisation de notions cinématiques et des nombres

Laurent Goffart

► To cite this version:

Laurent Goffart. Critique de la cérébralisation de notions cinématiques et des nombres. 24èmes rencontres enseignants - chercheurs, Mickael Albre et Paola Cantu, Mar 2024, Aix-en-Provence, France. ⟨hal-04523462⟩

HAL Id: hal-04523462

<https://hal.science/hal-04523462v1>

Submitted on 27 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License



Aix-Marseille
université

24èmes rencontres enseignants - chercheurs
Aix-en-Provence
27 mars 2024



Centre Gilles Gaston Granger
U M R 7 3 0 4

Critique de la cérébralisation de notions cinématiques et des nombres

laurent.goffart@cnr.fr

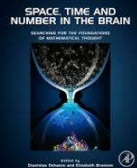
<https://cv.hal.science/laurent-goffart>

Confusions

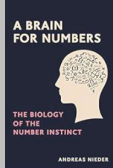
Au cours des dernières décennies, une **confusion** s'est installée dans les neurosciences cognitives entre

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


L'association de notions théoriques à certaines mesures ont conduit des auteurs à imaginer 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



2000



2007



2004

Confusions

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
- certains concepts (notions générales appartenant à notre langage).

L'association de notions théoriques à certaines mesures a conduit des auteurs à imaginer 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 lors 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 lui-même est sous le contrôle des groupes de neurones qui sont 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 de position (mesures) et une structure radicalement différente : une structure diffuse puis confluyente, dont les éléments sont spatialement distribués et dont les activités se chevauchent temporellement.

Entre les nerfs optiques et les nerfs moteurs oculaires

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 (diffuence)**. L'activité évoquée se propage, distribuée dans de multiples foyers et plus ou moins persistante.

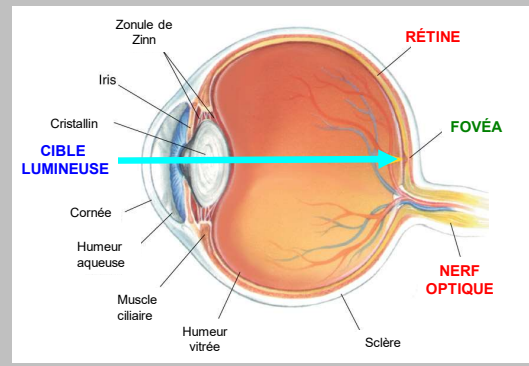
A mesure que l'activité se propage et rejoint les groupes de cellules à l'origine des nerfs moteurs qui innervent les muscles extra-oculaires, cette **explosion** se transforme en une sorte de **compression (confluence)** dont :

- la durée va déterminer la durée du mouvement et
- le recrutement de nouveaux groupes neuro-musculaires son ampleur.

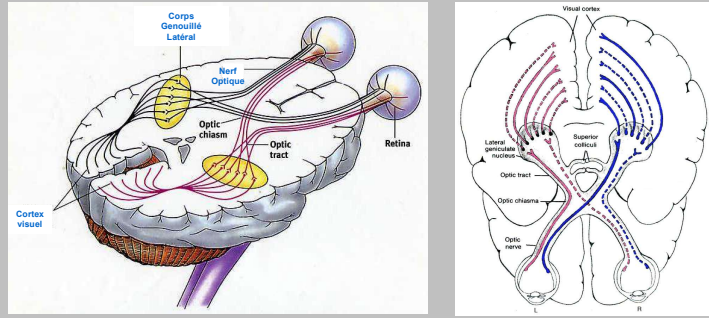
Alors que la trajectoire d'un corps **rigide** (œil ou objet) dans le monde physique peut être mathématiquement décrite comme une courbe sans épaisseur, son corrélat cérébral est "spatialement" et "temporellement" différent : il est **diffusif et élastique**.

L'œil

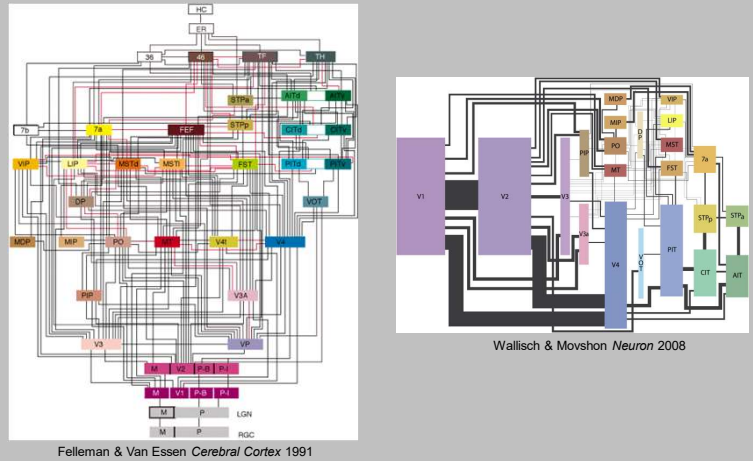
coupe sagittale



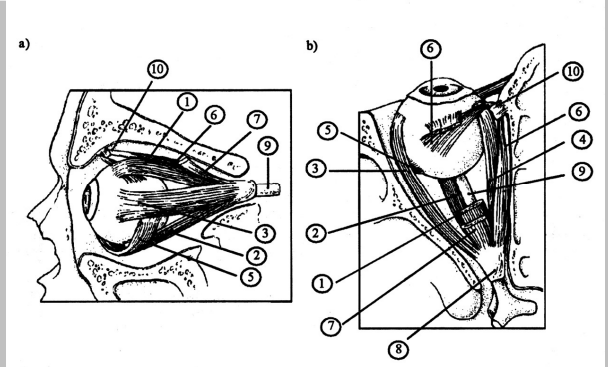
Au bout du nerf optique



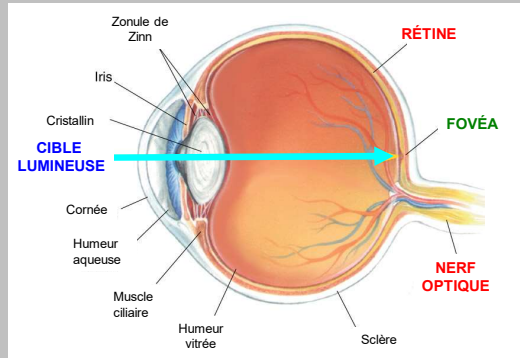
Explosion des signaux visuels: **différence spatiale et temporelle**



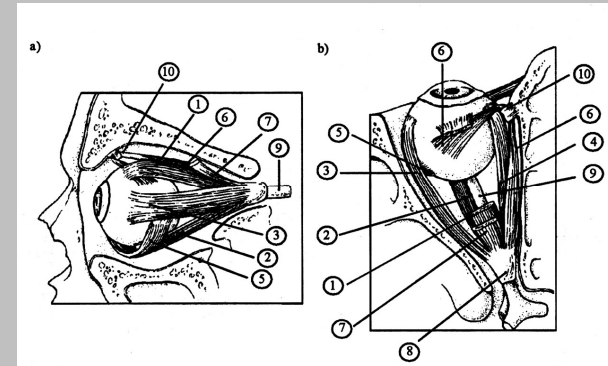
L'œil n'est pas seulement une rétine



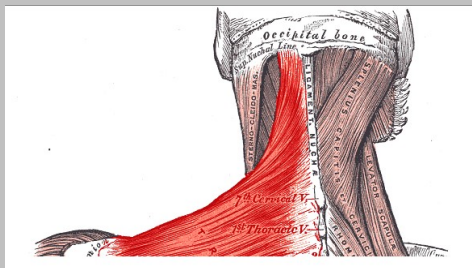
Projection de la cible sur la fovéa



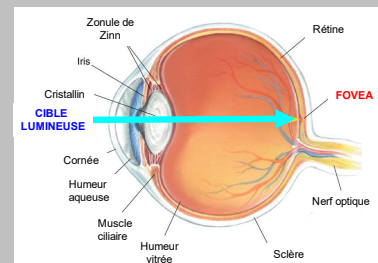
Projection de la cible sur la fovéa
SI & SSI contraction appropriée des muscles extraoculaires
 (direction du regard)



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

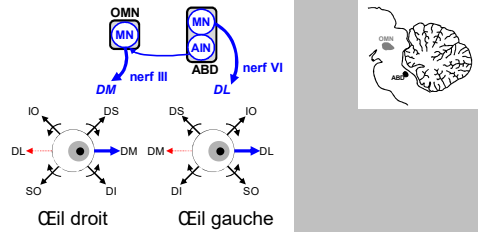


REGARDER UNE CIBLE =
 contracter une multitude de muscles



Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires

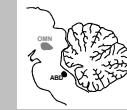
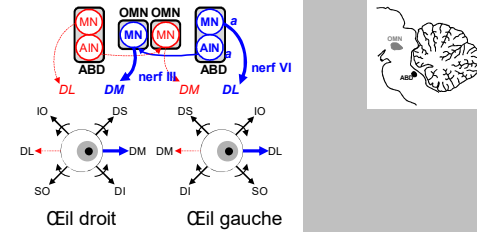
SACCADE VERS LA GAUCHE



modifié de Goffart, Quinet & Bourelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires

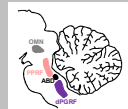
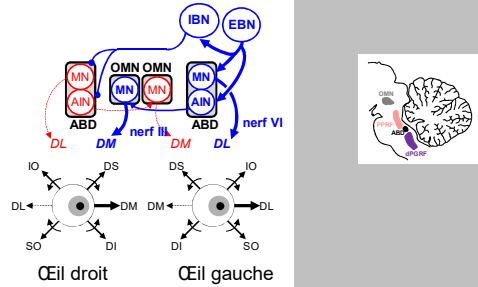
SACCADE VERS LA GAUCHE



modifié de Goffart, Quinet & Bourelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires

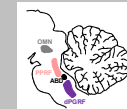
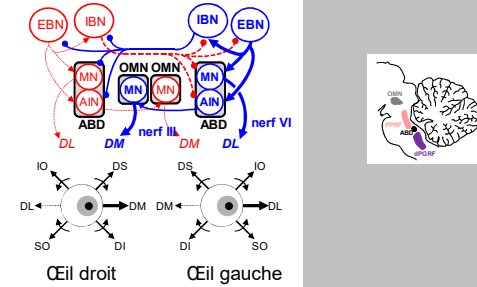
SACCADE VERS LA GAUCHE



modifié de Goffart, Quinet & Bourelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

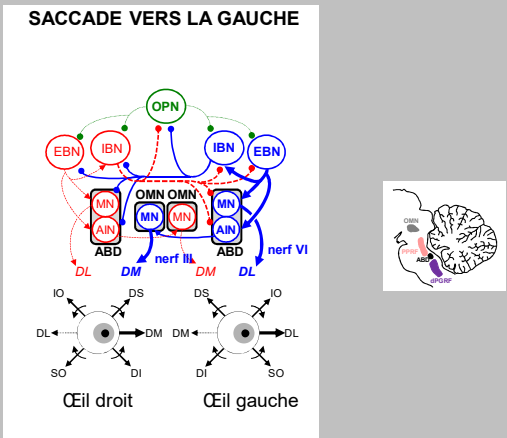
Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires

SACCADE VERS LA GAUCHE



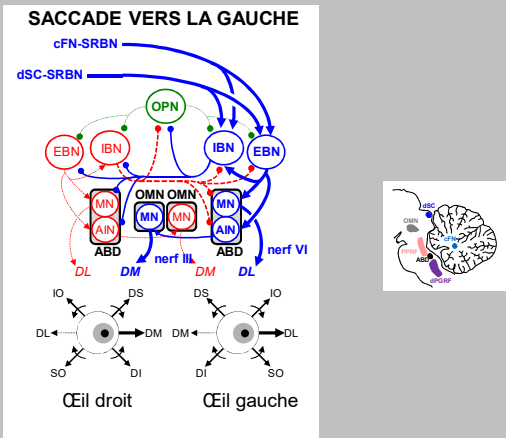
modifié de Goffart, Quinet & Bourelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires



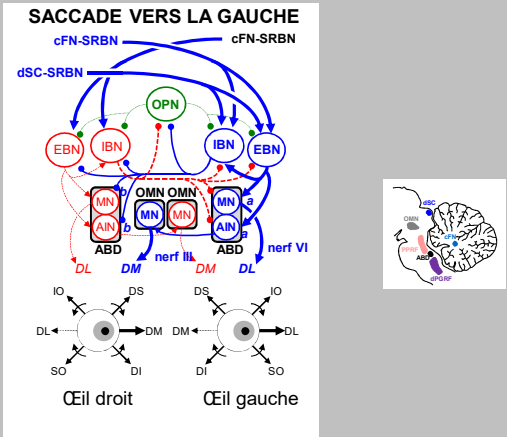
modifié de Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires



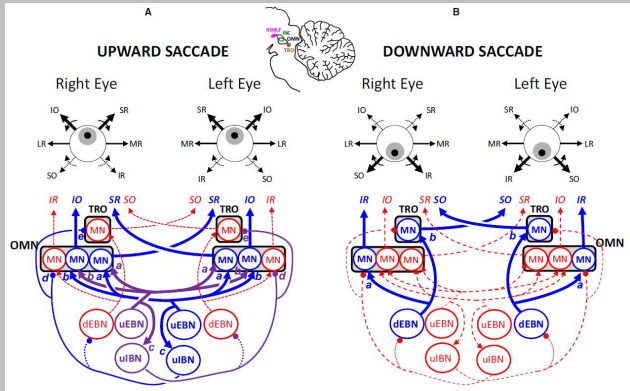
modifié de Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires



modifié de Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

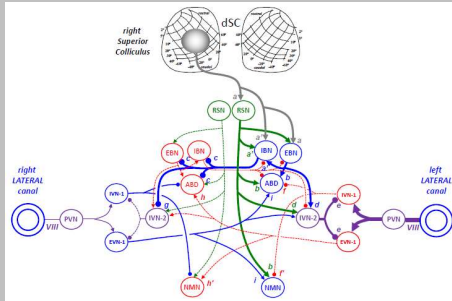
Confluence à l'origine des nerfs moteurs oculaires



Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

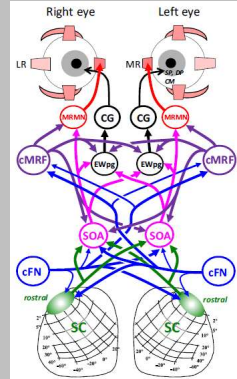
Confluence à l'origine des nerfs oculomoteurs

Orienter les yeux et la tête vers la gauche



Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

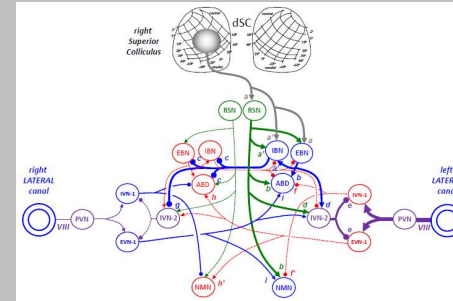
Regarder une cible qui se rapproche



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**

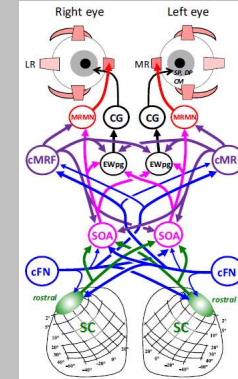


Orienter les yeux et la tête vers la gauche



Goffart, Quinet & Bourrelly *Encyclopedia of the Human Brain* 2024

Regarder une cible qui se rapproche

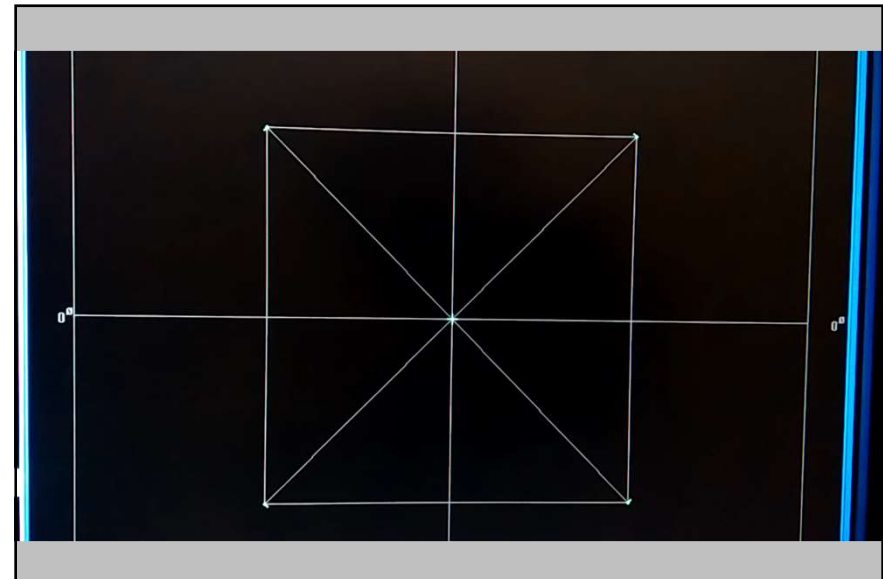
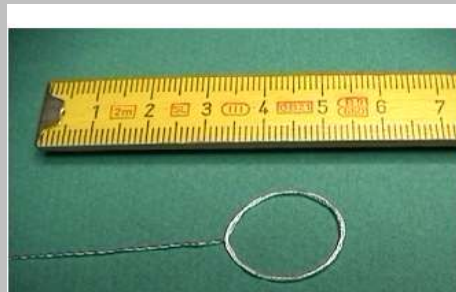


Enregistrement des mouvements oculaires

Induction électro-magnétique

Bobine sclérale

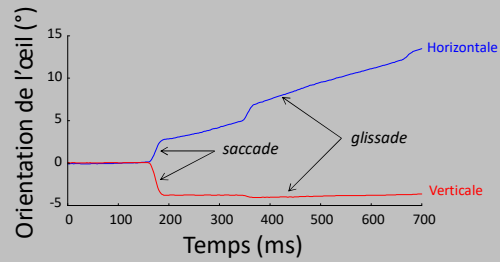
2 champs magnétiques : H et V



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

rapide : saccade
lent : glissade

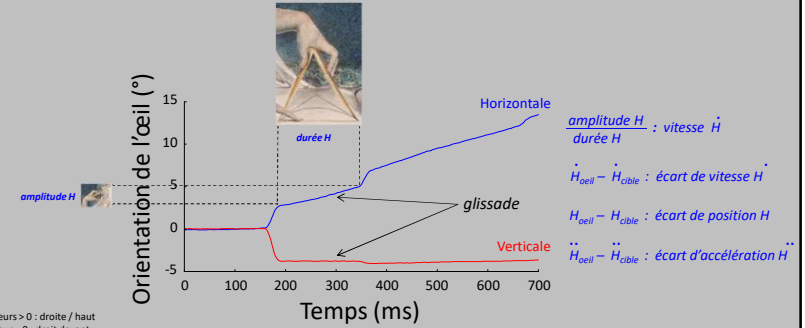
mêmes muscles mais réseaux neuronaux en amont largement distincts



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

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

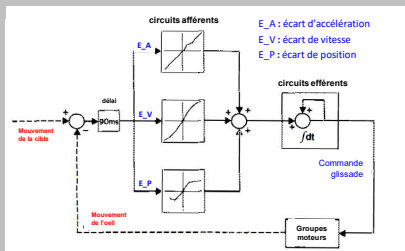
rapide : saccade
lent : glissade



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

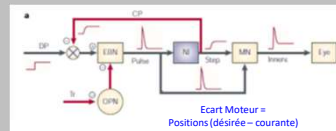
Grandeurs physiques et arithmétique dans le cerveau ?

CIRCUIT GLISSADE



Lisberger, Morris & Tychsen Annual Review of Neuroscience 1987

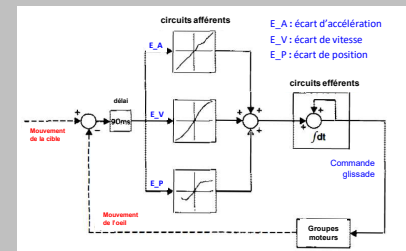
CIRCUIT SACCADE



Sparks Nature Neuroscience Reviews 2002

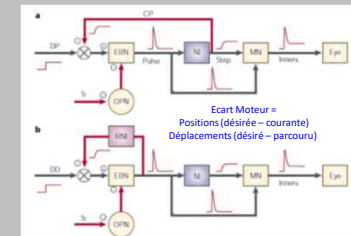
Grandeurs physiques et arithmétique dans le cerveau ?

CIRCUIT GLISSADE



Lisberger, Morris & Tychsen Annual Review of Neuroscience 1987

CIRCUIT SACCADE

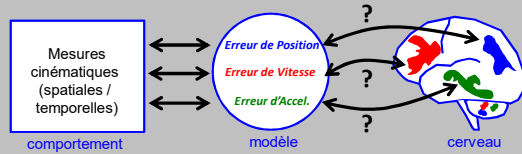


Sparks Nature Neuroscience Reviews 2002



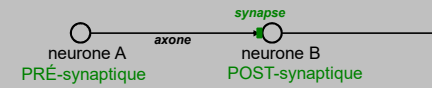
Quantités physiques et arithmétique dans le cerveau ?

ISOMORPHISME CERVEAU - MODÈLE REMIS EN QUESTION

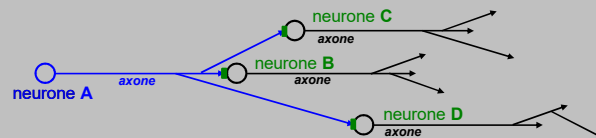


Mesurer et modéliser le mouvement du globe oculaire (corps rigide) avec des notions cinématiques **n'implique pas** nécessairement une équivalence dans le cerveau, à savoir que l'activité des neurones "code" (c'est-à-dire **émette des signaux liés à**) l'amplitude, la vitesse ou l'accélération du mouvement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

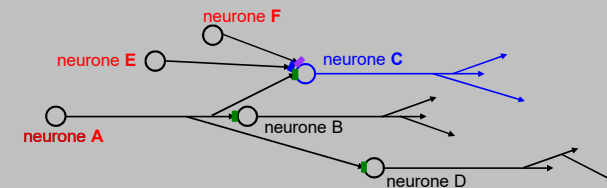
La synapse



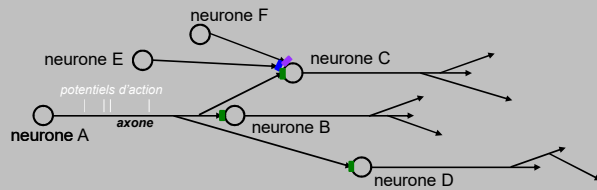
Chaque neurone (A) contacte plusieurs neurones POST-synaptiques (B, C et D)



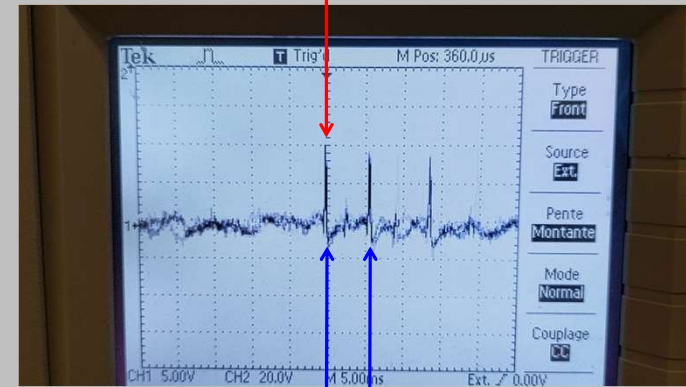
Chaque neurone (C) est contacté par plusieurs neurones PRÉ-synaptiques (A, E et F)



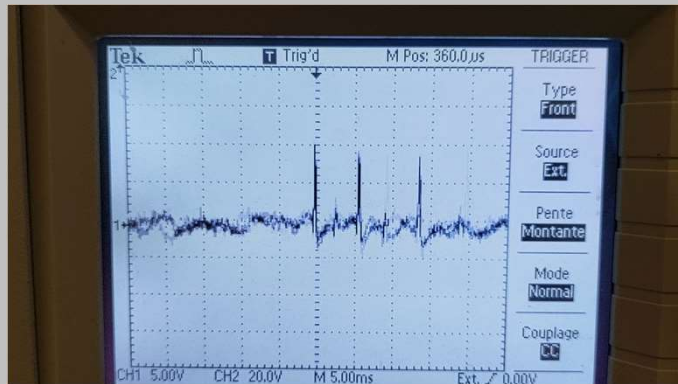
Les neurones émettent des potentiels d'action qui se propagent de long de l'axone



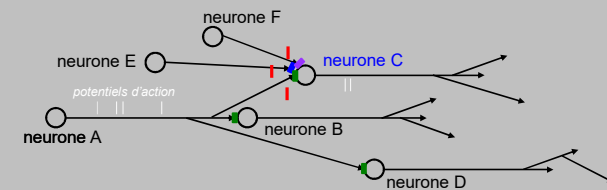
potentiel d'action 1 milliseconde (1/1000 seconde)



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

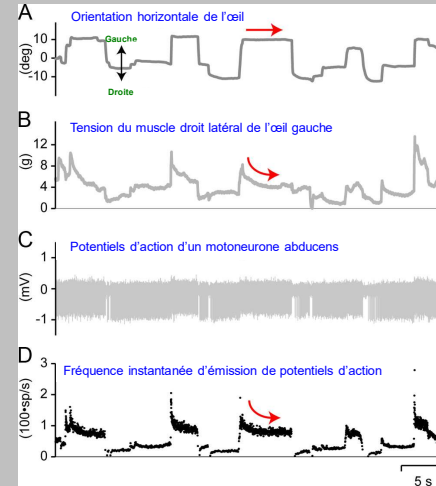
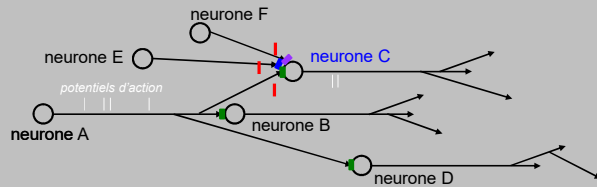


La probabilité qu'un neurone (C) émette un potentiel d'action dépend de la quasi-simultanéité des potentiels pré-synaptiques (lorsque l'influence est excitatrice).

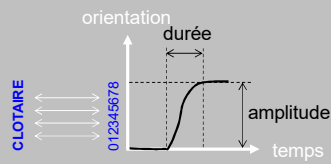
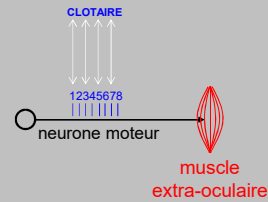
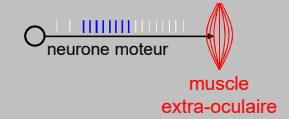


La probabilité qu'un neurone (C) émette un potentiel d'action dépend de la quasi-simultanéité des potentiels pré-synaptiques (lorsque l'influence est excitatrice).

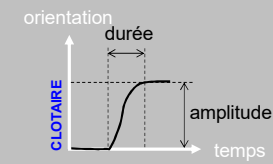
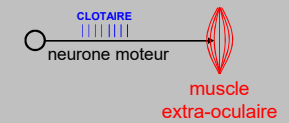
Il existe aussi des influences inhibitrices. Elles rendent le neurone post-synaptique insensible aux excitations.



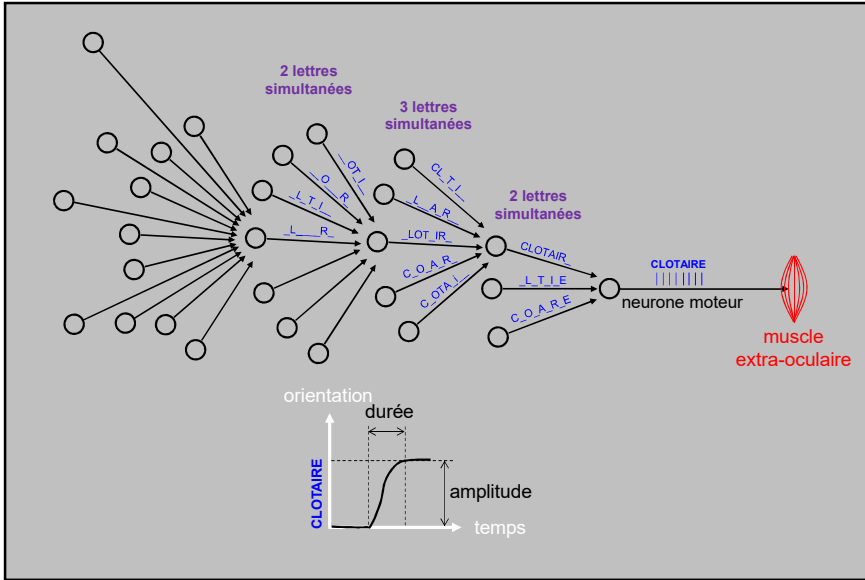
Davis-Lopez de Carrizosa et al. *Journal of Neuroscience* 2011



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



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



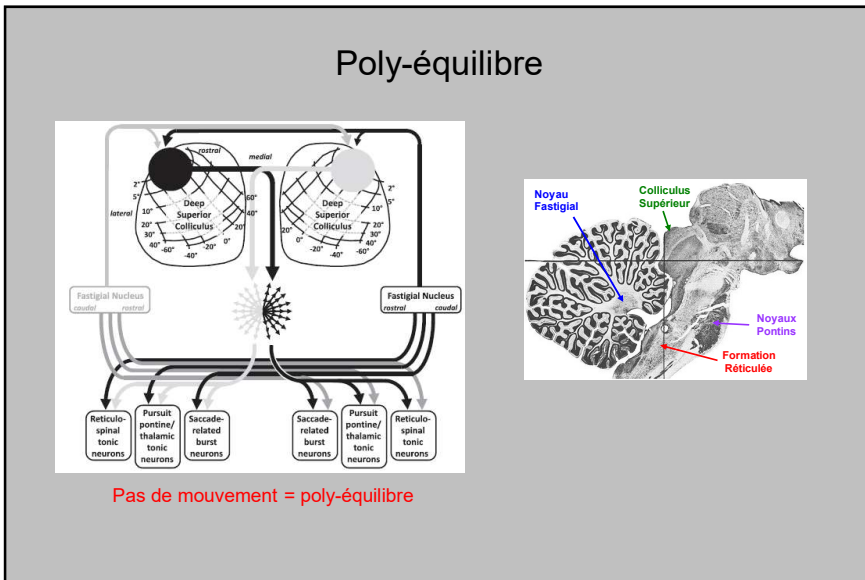
Quantités physiques et arithmétique dans le cerveau ?

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.



Direction du regard: un poly-équilibre

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

Goffart, Hafed & Krauzlis
Journal of Neuroscience
2012

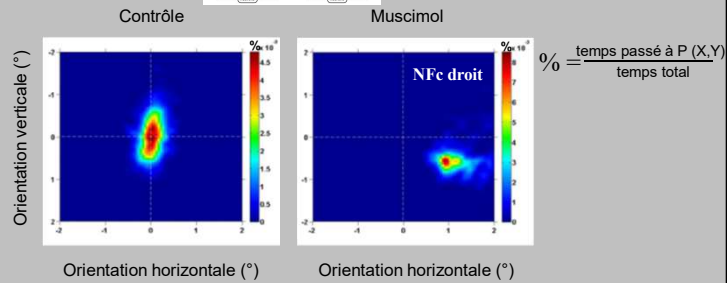
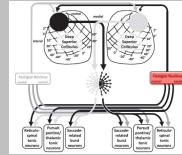
CIBLE STATIQUE

Décalage de fixation
Saccades vers cibles périphériques précises

Direction du regard: un poly-équilibre

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

Guerrasio, Quinet, Büttner & Goffart
Journal of Neurophysiology
2010



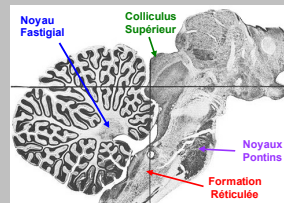
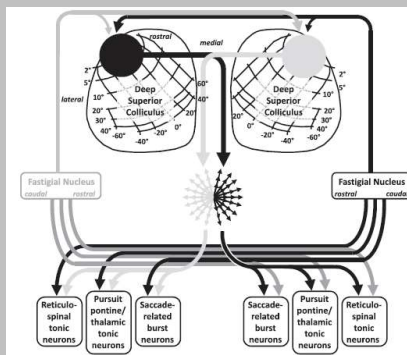
Direction de la tête: un poly-équilibre

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



Goffart & Péllisson
Journal of Neurophysiology
1998

Poly-équilibres et restauration



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

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."

Helen De Cruz (2006):

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

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**."

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)

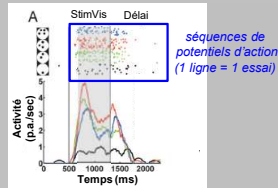
Des structures cognitives sont externes à l'individu. Elles "**dépendent d'instruments externes** (livres, bibliothèques, instruments de calcul et d'observation, etc.) ainsi que de **structures sociales de productions et de cumulation des connaissances** (encyclopédies, sociétés savantes etc.) ... la 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"

The collage features several scientific articles and reviews. Key titles include 'The Evolutionary History of Brains for Numbers' (Trends in Cognitive Sciences 2021), 'The Adaptive Value of Numerical Competence' (Trends in Ecology and Evolution 2020), 'Neuroethology of number sense across the animal kingdom' (Journal of Experimental Biology 2021), 'Neural constraints on human number concepts' (Current Opinion Neurobiology 2020), 'The neuronal code for number' (Nature Reviews Neuroscience 2016), 'Coding of abstract quantity by "number neurons" of the primate brain' (Journal of Comparative Physiology 2013), 'A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey' (PNAS 2004), 'Number Faculty Is Rooted in Our Biological Heritage' (Philosophical Trans/ Royal Soc. 2017), 'Evolution of cognitive and neural solutions enabling numerosity judgements: lessons from primates and convids' (Philosophical Trans/ Royal Soc. 2017), and 'Representation of Number in the Brain' (Annual Review Neuroscience 2009). The authors mentioned are Andreas Nieder and Stanislas Dehaene.

Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex

Oana Tudusciuc and Andreas Nieder*

PNAS 2007

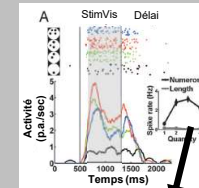


séquences de potentiels d'action (1 ligne = 1 essai)

Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex

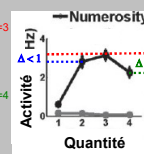
Oana Tudusciuc and Andreas Nieder*

PNAS 2007



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

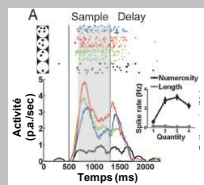


Parmi la multitude de potentiels d'action qu'ils reçoivent d'autres neurones pendant 600 millisecondes, comment les neurones **post-synaptiques** font-ils pour distinguer le potentiel d'action émis par ce neurone et permettent au singe de produire une réponse différente selon qu'il y a 2, 3 ou 4 stimuli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

Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex

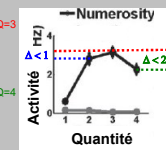
Oana Tudusciuc and Andreas Nieder*

PNAS 2007

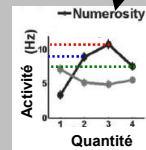
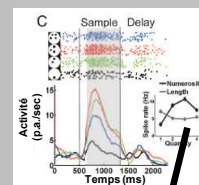


Entre Q=2 et Q=3
 $\Delta(2,3) < 1$ pa/s
0,1 pa/100 ms
1 pa/600 ms

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 ?



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

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

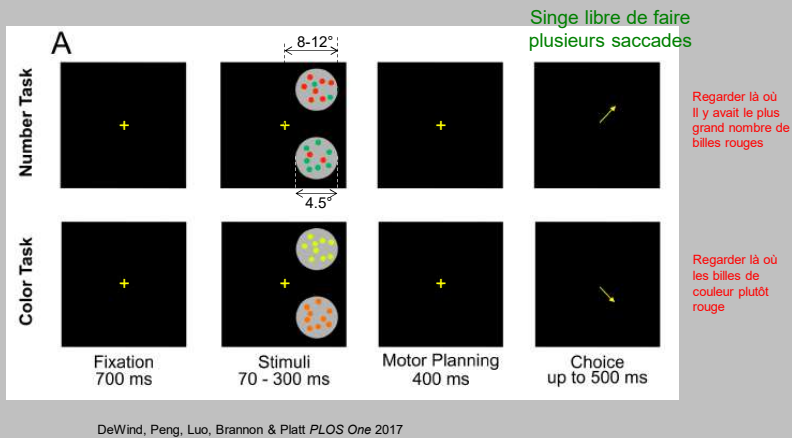
Une corrélation entre la cadence d'émission des potentiels d'action et un événement externe (nombre d'éléments dans le champ visuel) n'implique pas nécessairement que les potentiels d'action contribuent à la réponse comportementale.

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

Nicholas K. DeWind^{1,2}, Jiyun Peng², Andrew Luo³, Elizabeth M. Brannon¹, Michael L. Platt^{1,4,5}

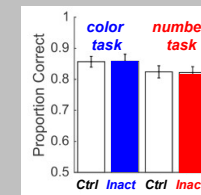
PLOS One 2017

Tâches de discrimination



VIP ne participe pas à la "comptabilité" visuelle

Inactivation de VIP

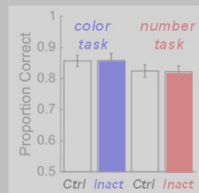


DeWind, Peng, Luo, Brannon & Platt *PLOS One* 2017

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

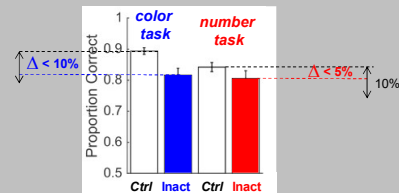
LIP ne participe pas non plus à la "comptabilité" visuelle

Inactivation de VIP



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

Inactivation de LIP



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 prémisse, 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 ordinaire, l'attention visuelle ou la prise de décision perceptive

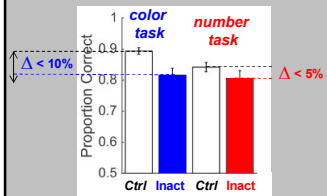


Surenchère cognitiviste :

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

Explication plus simple

Inactivation de LIP



Les légères baisses de performance de 8% (discrimination des couleurs) et de 4% (discrimination quantitative) peuvent simplement résulter d'une légère déficience visuelle (diplopie, divergence oculaire, etc. ?).

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

Neurons in Monkey Parietal Area LIP Are Tuned for Eye-Movement Parameters in Three-Dimensional Space
 JAMES W. GNADT AND LAWRENCE E. MAYS
 Department of Neurobiology and Behavior, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, New York 11794; and Department of Physiological Optics, School of Optometry, University of Alabama at Birmingham, Birmingham, Alabama 35294
Journal of Neurophysiology 1995

Conclusion

L'implication du cortex pariétal dans une "cognition" numérique ne repose sur aucune preuve neurophysiologique.

Les études d'imagerie cérébrale chez l'Homme ne disent rien de l'activité des neurones. Le signal IRMF-BOLD reflète l'activité pré-synaptique plutôt que l'émission de potentiels d'action des neurones (Lippert et al. *Magnetic Resonance Imaging* 2010).

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

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

Les limitations des mesures et les notions théoriques qui leur étaient maladroitement associées ont conduit certains auteurs à imaginer des options 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 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.)**" (Sylvain **Auroux** 1998).

"Les mathématiques sont une œuvre d'art collective qui tirent leur objectivité des interactions sociales." (Rav 1988)

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

Merci de votre attention



Pour plus d'informations : <https://cv.hal.science/laurent-goffart>



Cérébralisation de la notion d'espace
 Critique des thèses nativistes ...

<https://cnrs.hal.science/>
 tel-04070171