



Physiopathologie de la motricité volontaire



Yves Rossetti
PU-PH

Equipe Trajectoires du CRNL : www.crnل.fr
Mouvement et Handicap (HCL & CRNL)

&



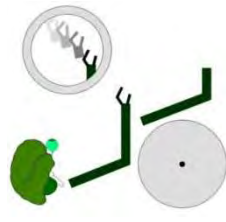
Perrine Séguin
Doctorante en neurosciences, Médecin MPR
Equipe Cophy du CRNL

Les grandes lignes

- Bref historique
- Rappels: deux caricatures
- Des interactions réflexe / volontaire
- Organisation hiérarchique
- Execution/programmation/planification/contrôle moteur
- Du réflexe à l'automatisme
- Supervision des automatismes
- Sélection et inhibition
- Plasticité de l'action
- Synthèse
- Perspectives ?



Mouvement et Handicap



Perception



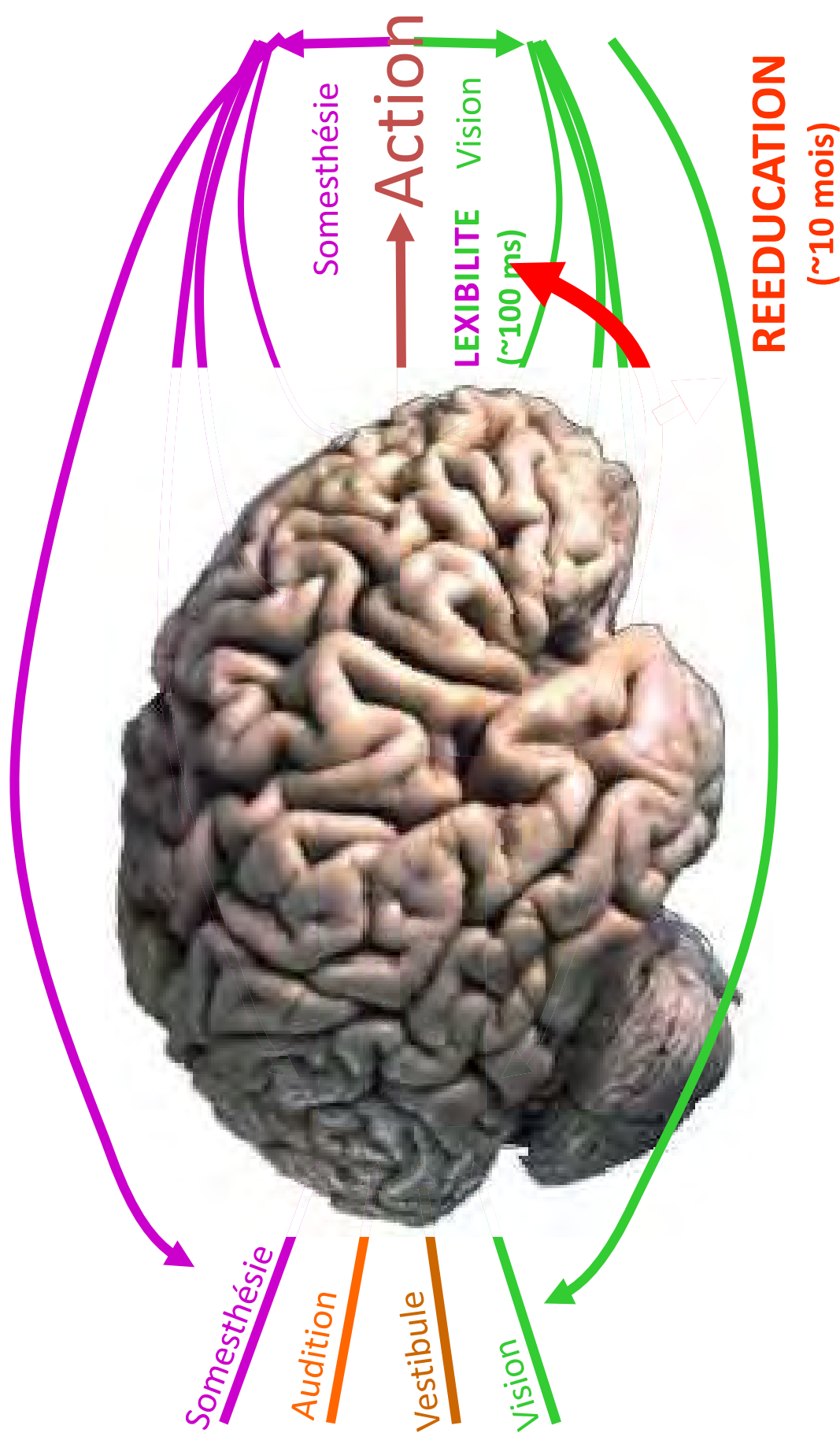
**Central
Representations**



Action



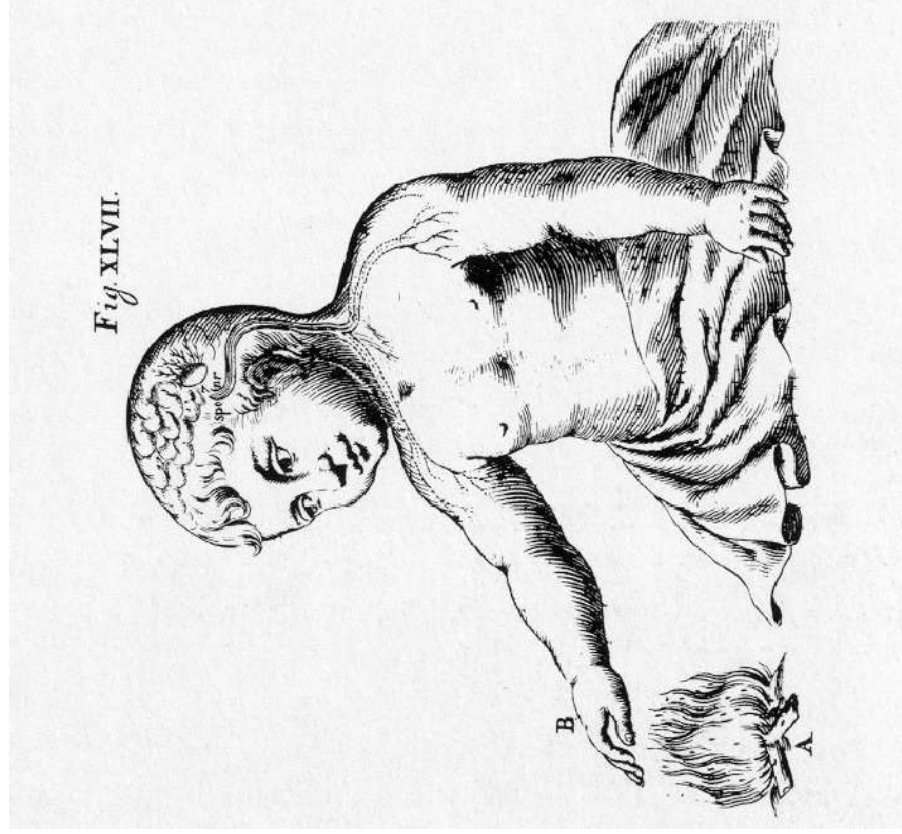
Perception-action...



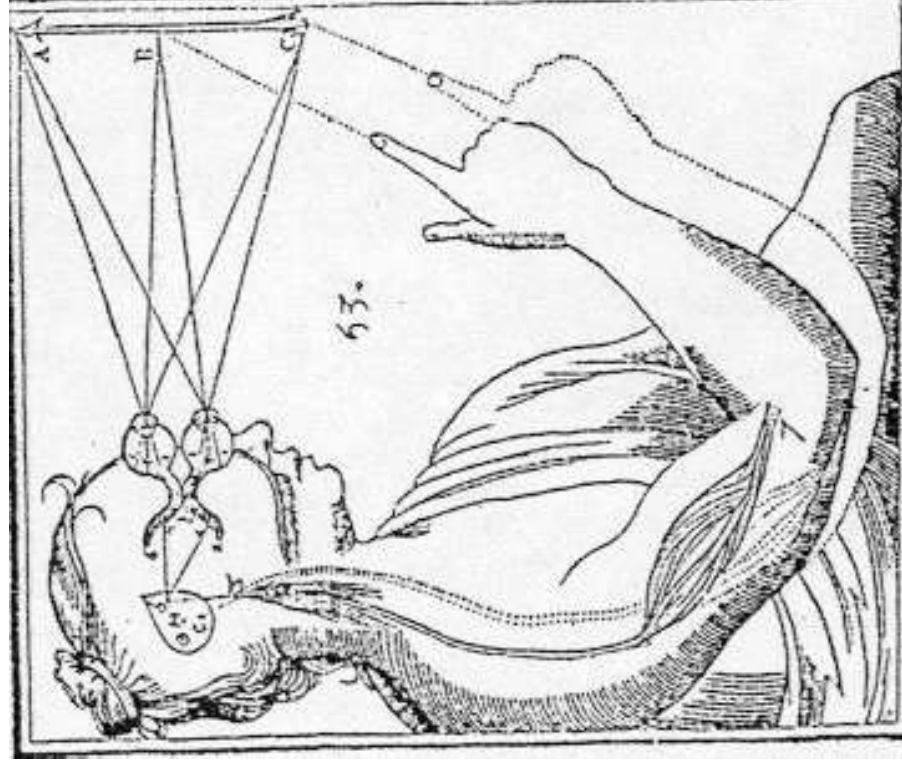
Ou action-perception ?

The brain from inside out, Buzsaki, 2019

Descartes



Réflexe

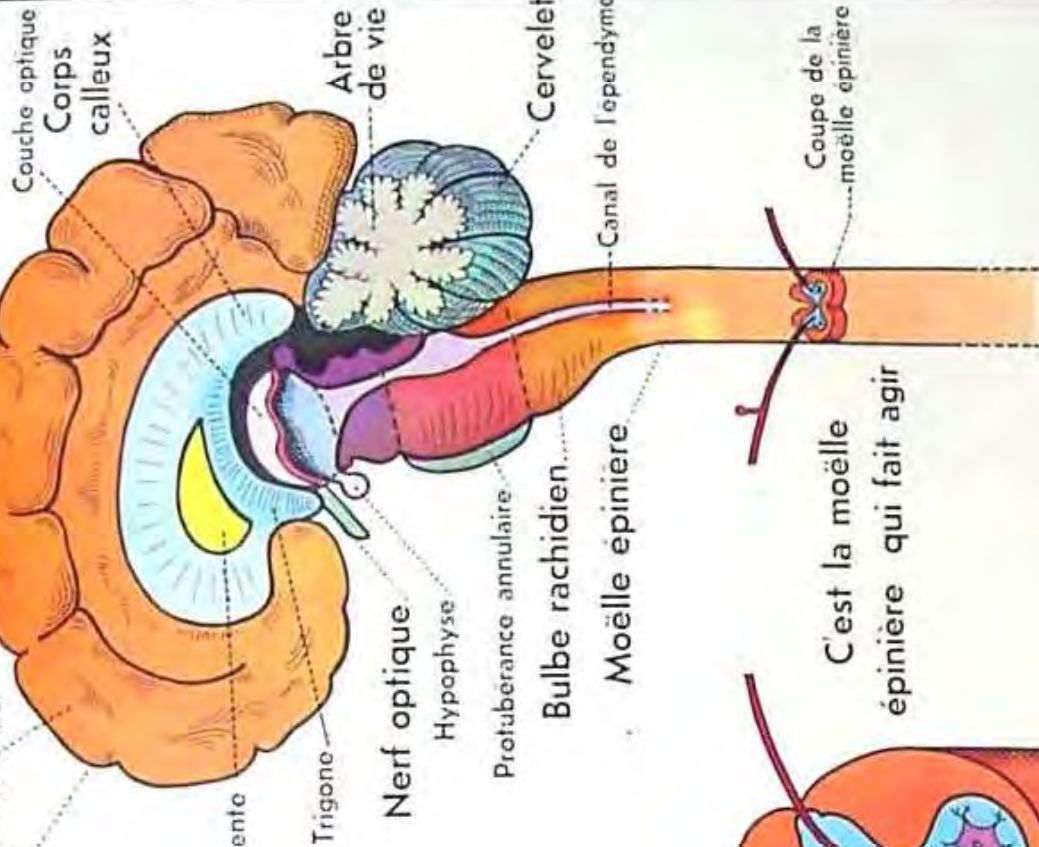


Volontaire

LE SYSTÈME NERVEUX

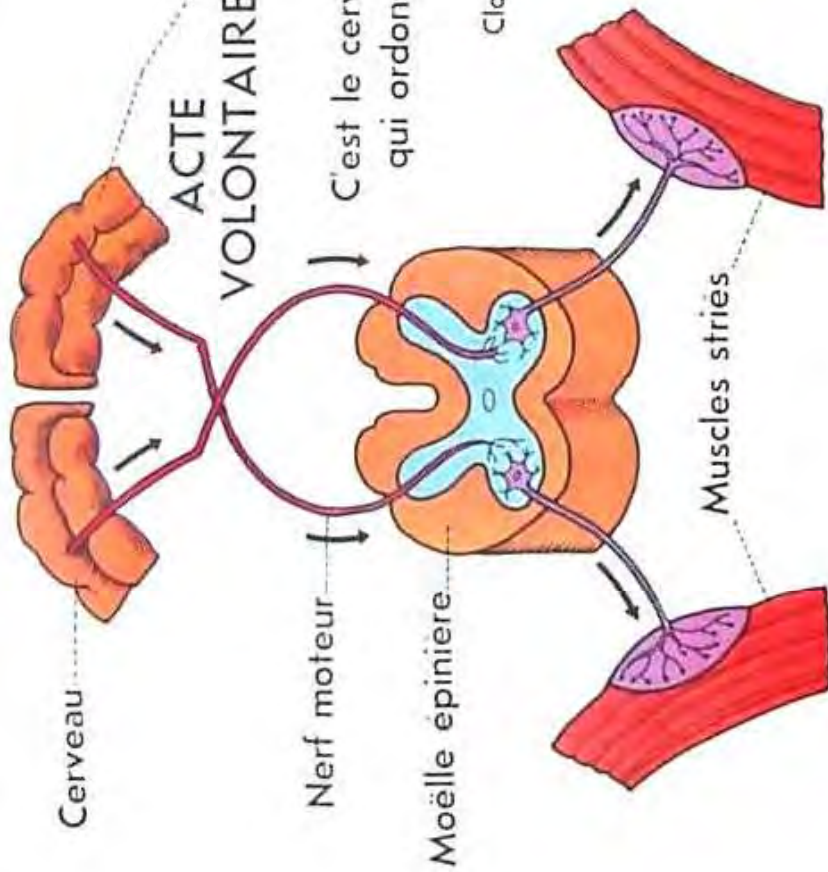
COUPE DE L'ENCEPHALE (coté droit)

Circonvolutions du cerveau



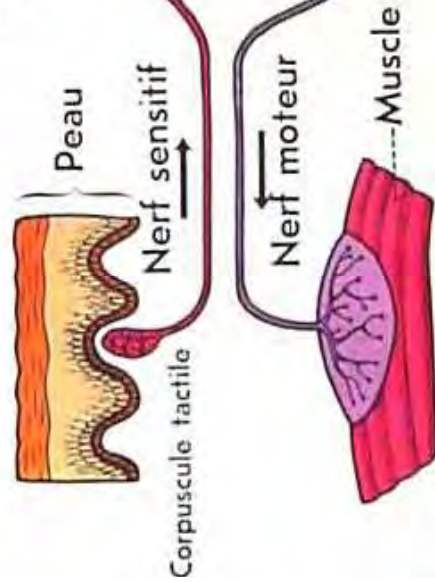
ACTE VOLONTAIRE

C'est le cerveau qui ordonne



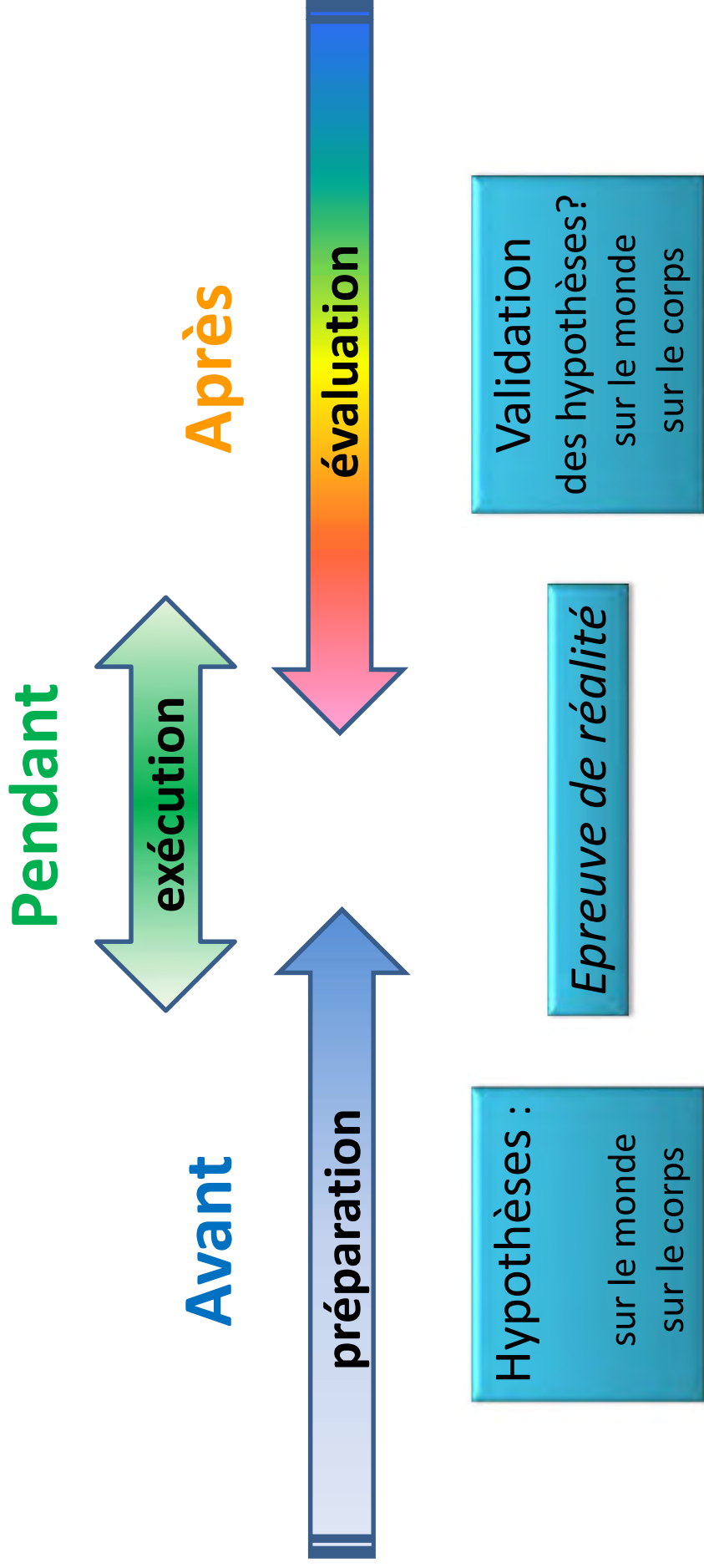
ACTE RÉFLEXE

Ganglion spinal

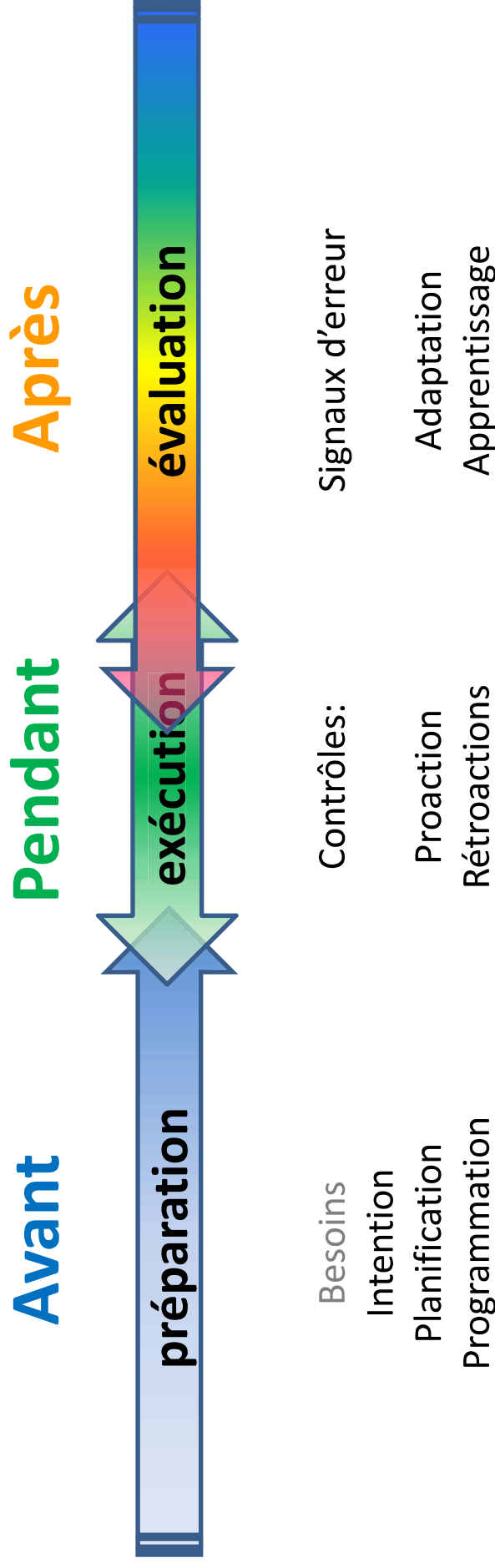


C'est la moëlle épinière qui fait agir

Une action simple



Une action simple



modèle de Sanders

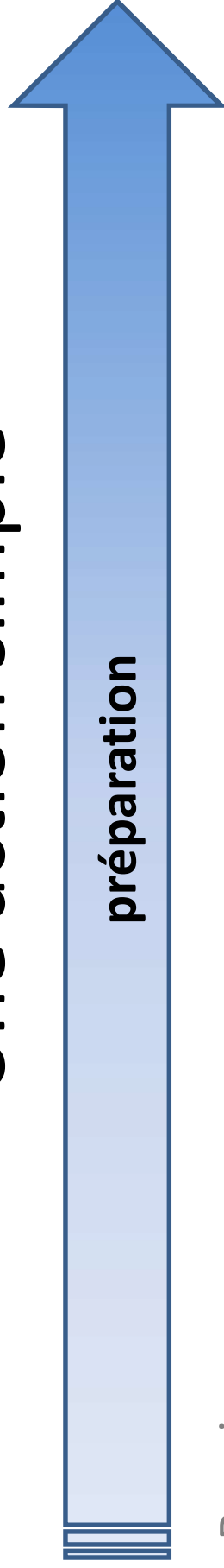
Intention (qu'est-ce que je veux faire ?)

Planification (quoi faire ? plan général, projet grossier)

Programmation (comment faire ? spécification des paramètres cinétiques d'exécution : vitesse, force, amplitude, direction, placement)

Exécution (réalisation du geste)

Une action simple



Besoins

Intention

Planification

Programmation

Élans de vie
...

Exécutif:
Inhibition
Élaborations
Sélections

Organisation

Métrique:
Espaces
Temps
Intensités

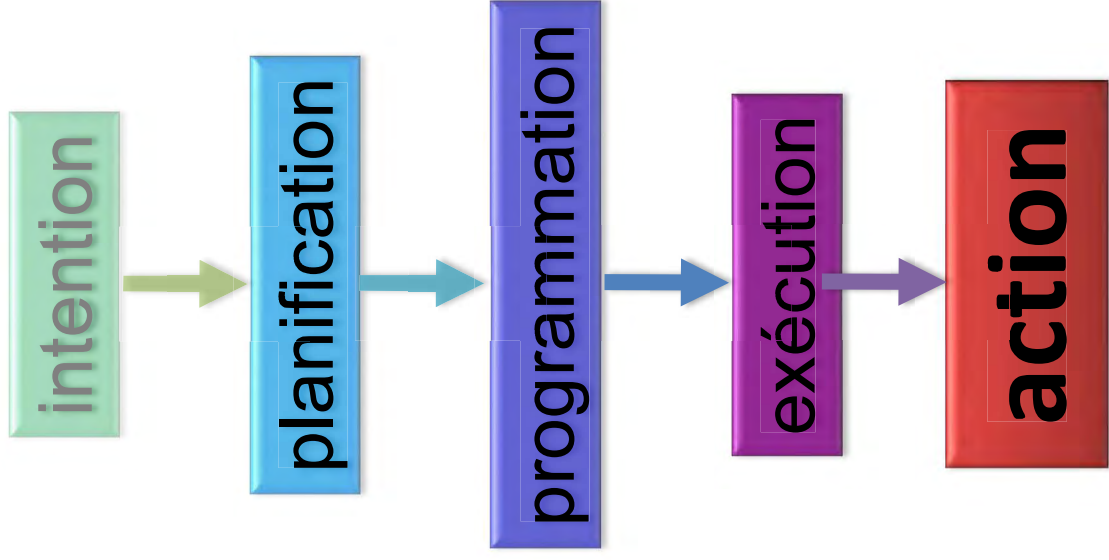
Intéroception
Proprioception

Extéroception
Proprioception

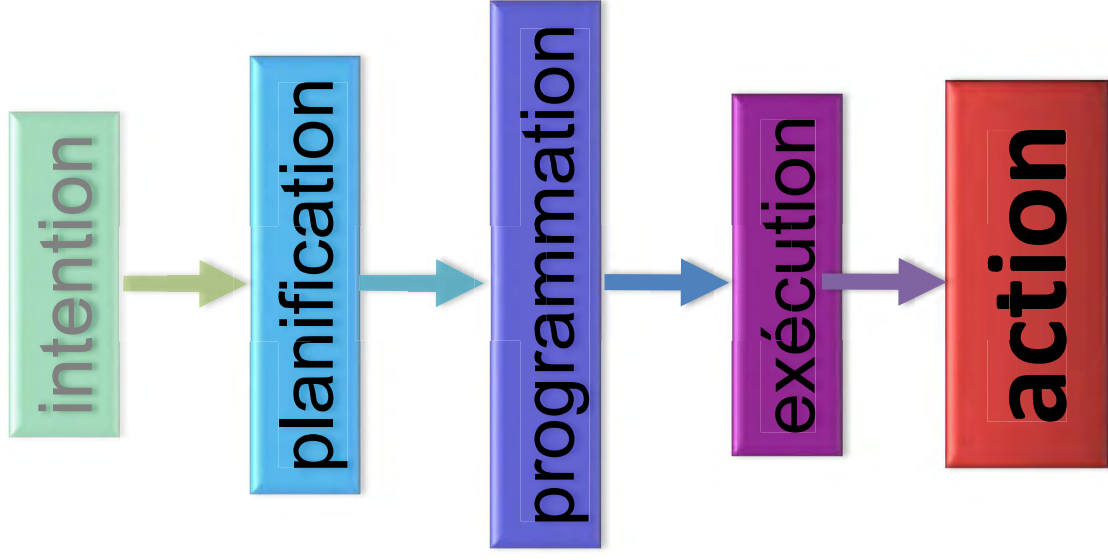
MOI

Le MONDE

L'organisation hiérarchique de l'action



L'organisation hiérarchique de l'action



Cx préfrontal

Cx prémoteur-
Ganglions de la base

A Motrice Supl.
Cervelet latéral

Cx moteur 1^{aire}

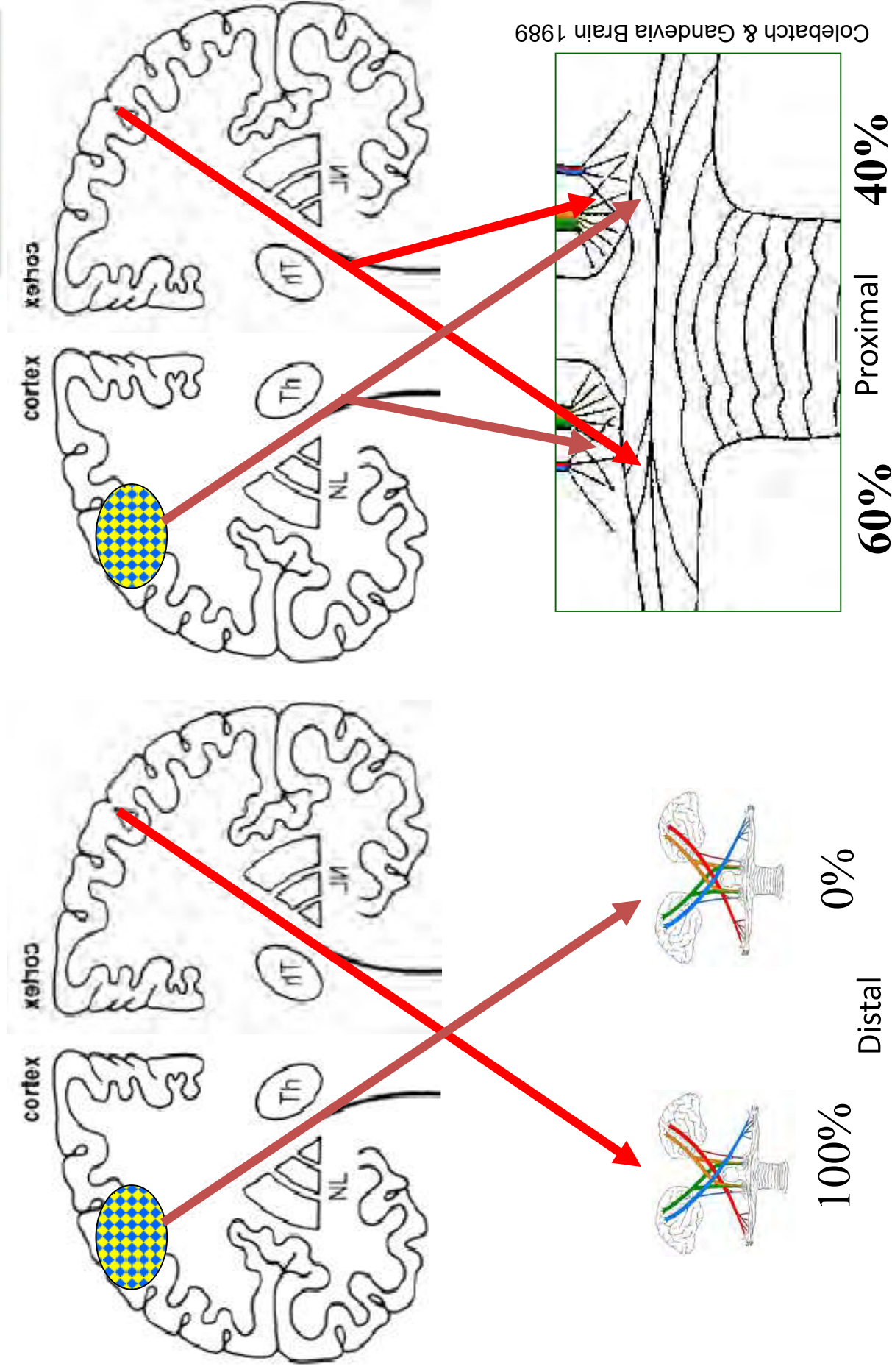
Moelle épinière

CONNAISSANCES

Exécution

Force musculaire après lésion corticale

exécution

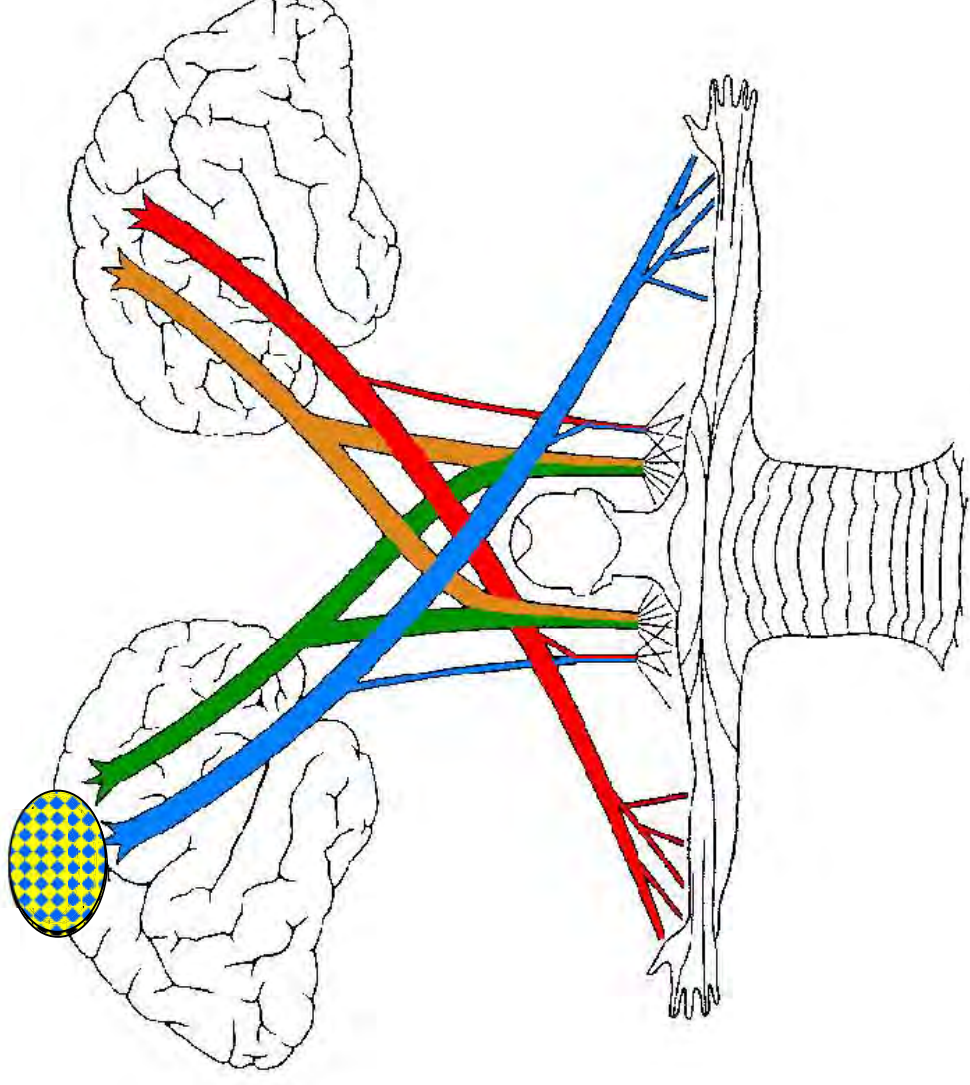


Faisceaux pyramidaux ???

Anatomistes : non, tout va décussar dans la voie cortico-spinale, donc il faut chercher l'explication ailleurs

Ou voie cortico-nucléaire ?

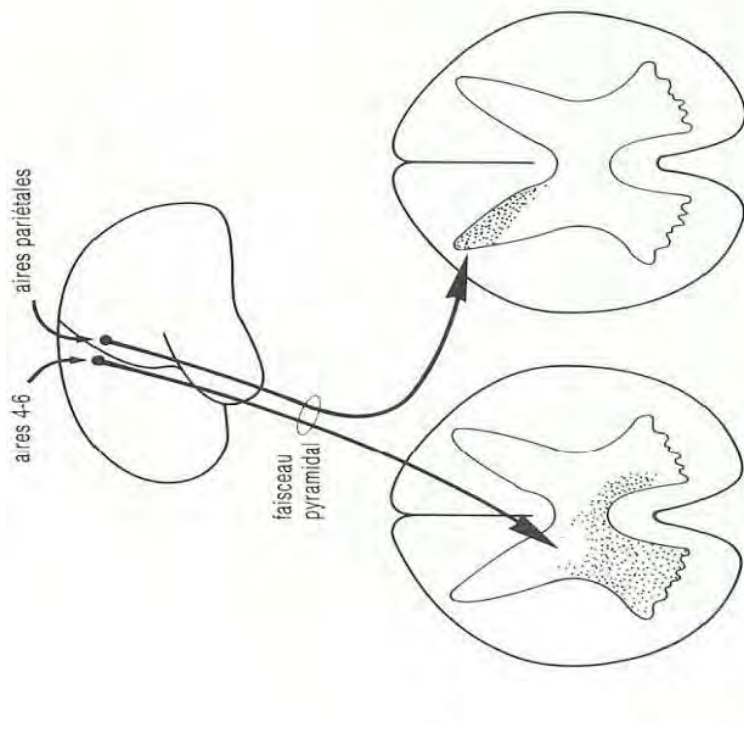
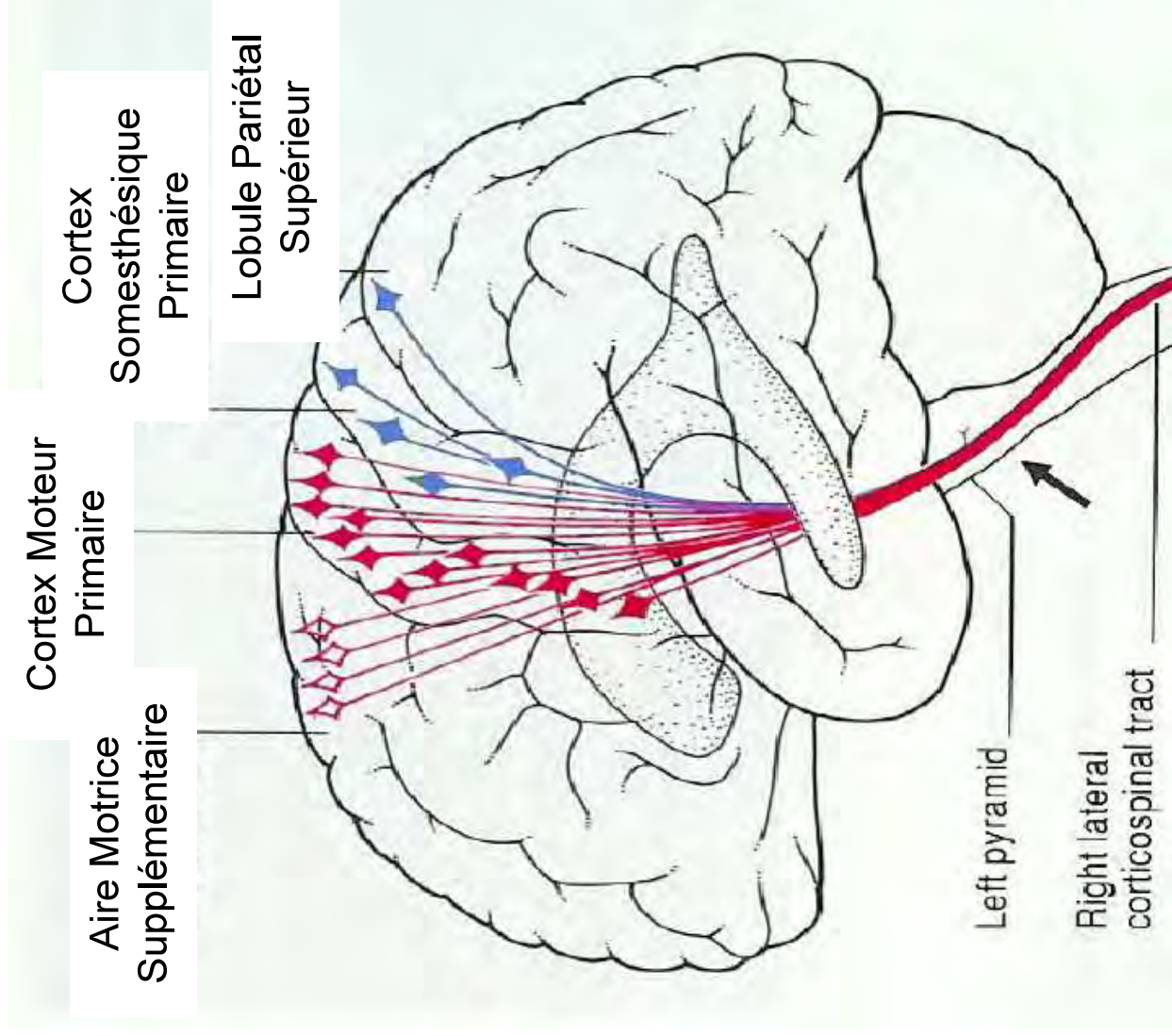
> Cf cours suivant sur l'anatomie fonctionnelle



exécution

Composition du faisceau pyramidal

exécution

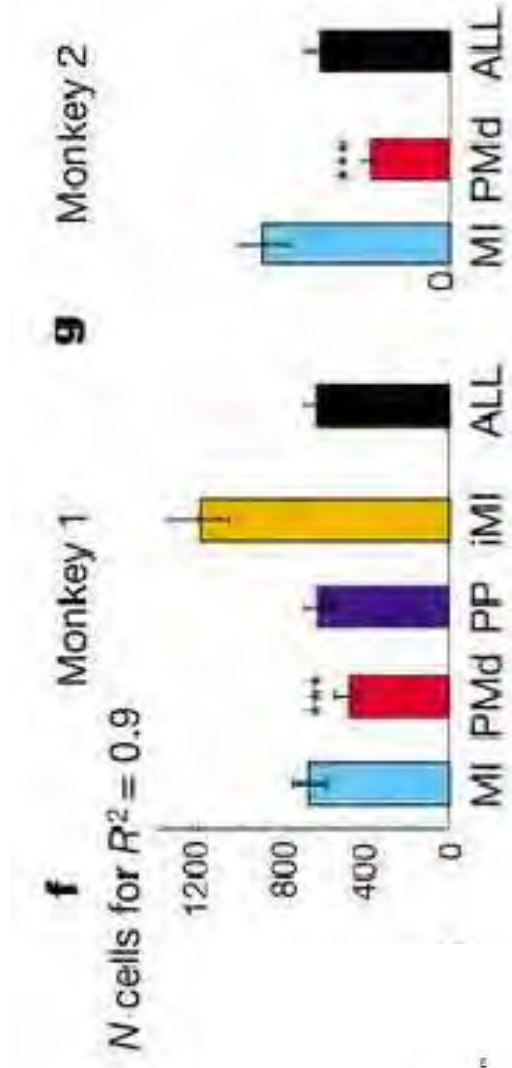
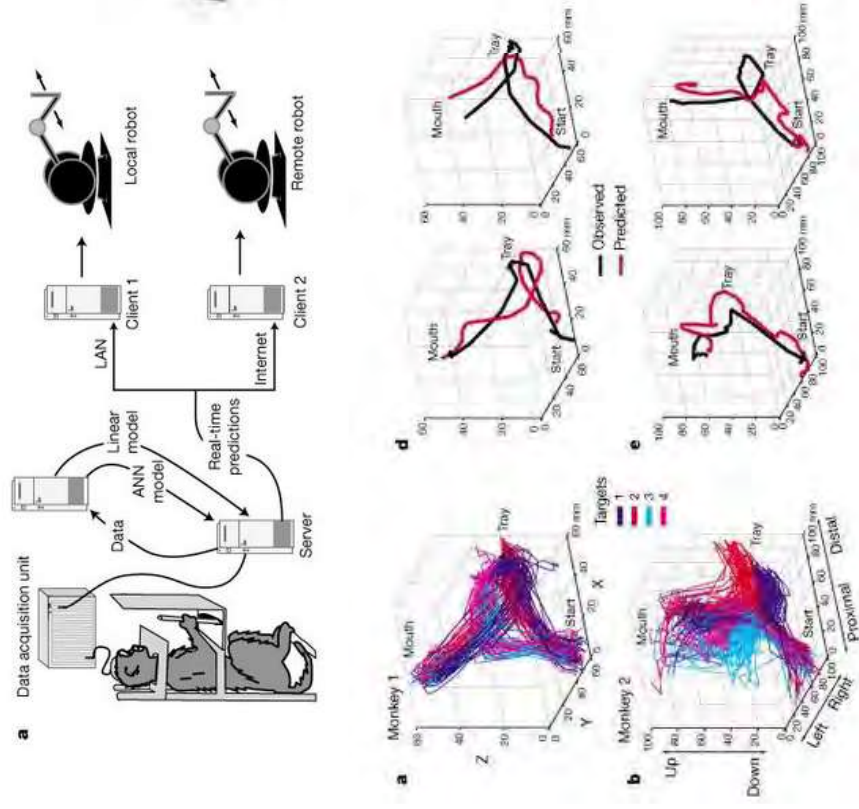


2^{ème} motoneurones
reçoivent plus

Décoder la direction du mouvement

exécution

Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates
Wessberg, [...], Nicolelis, Nature (2000)



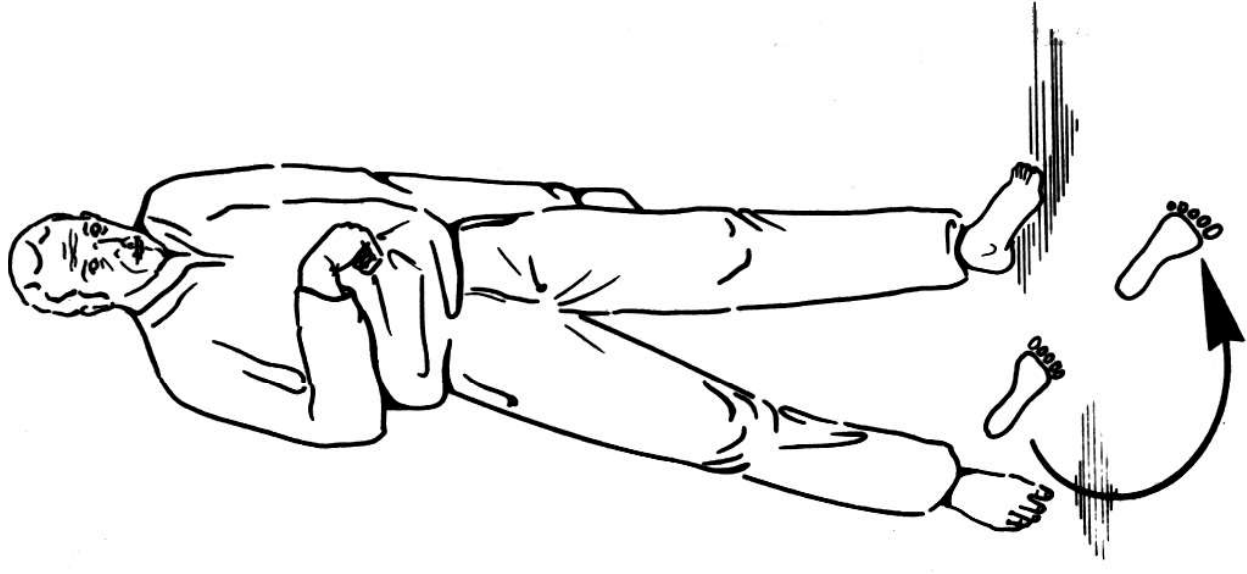
f, g, Estimated number of neurons per cortical area required to reach an R^2 of 0.9 using the hyperbolic functions in monkey 1 (f) and 2 (g). Lower values represent higher mean contribution per neuron.
Three asterisks, $P < 0.001$.

PP, posterior parietal cortex; M1, primary motor cortex; PMd, dorsal premotor cortex; iM1/PMd, ipsilateral M1 and PMd.

Lésion pyramidale: l'hémiplégie l'hémiparésie

- Déficit moteur
- Réflexes ostéo-tendineux exagérés
- MS: flexion
- MI: extension
- Réflexe Cutanéó-Plantaire: signe de Babinski

exécution



Programmation

comment faire ?

Une action motrice simple: plusieurs actions cognitives

préparation



Planification

Organisation

Sélections



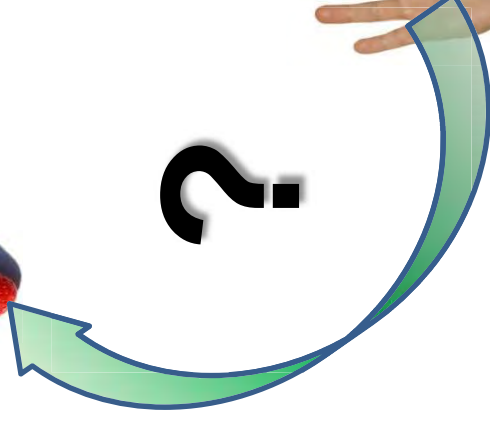
Programmation

Métrique:

Espaces

Temps

Intensités



Une action simple:

Plusieurs programmations simultanées

préparation

Programmation

Planification

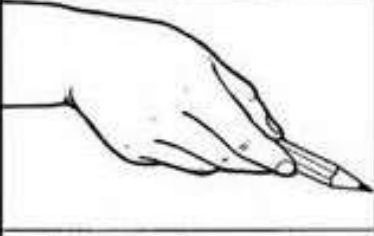
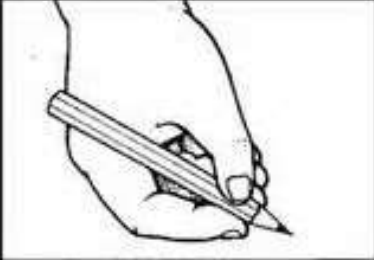
Organisation Sélections



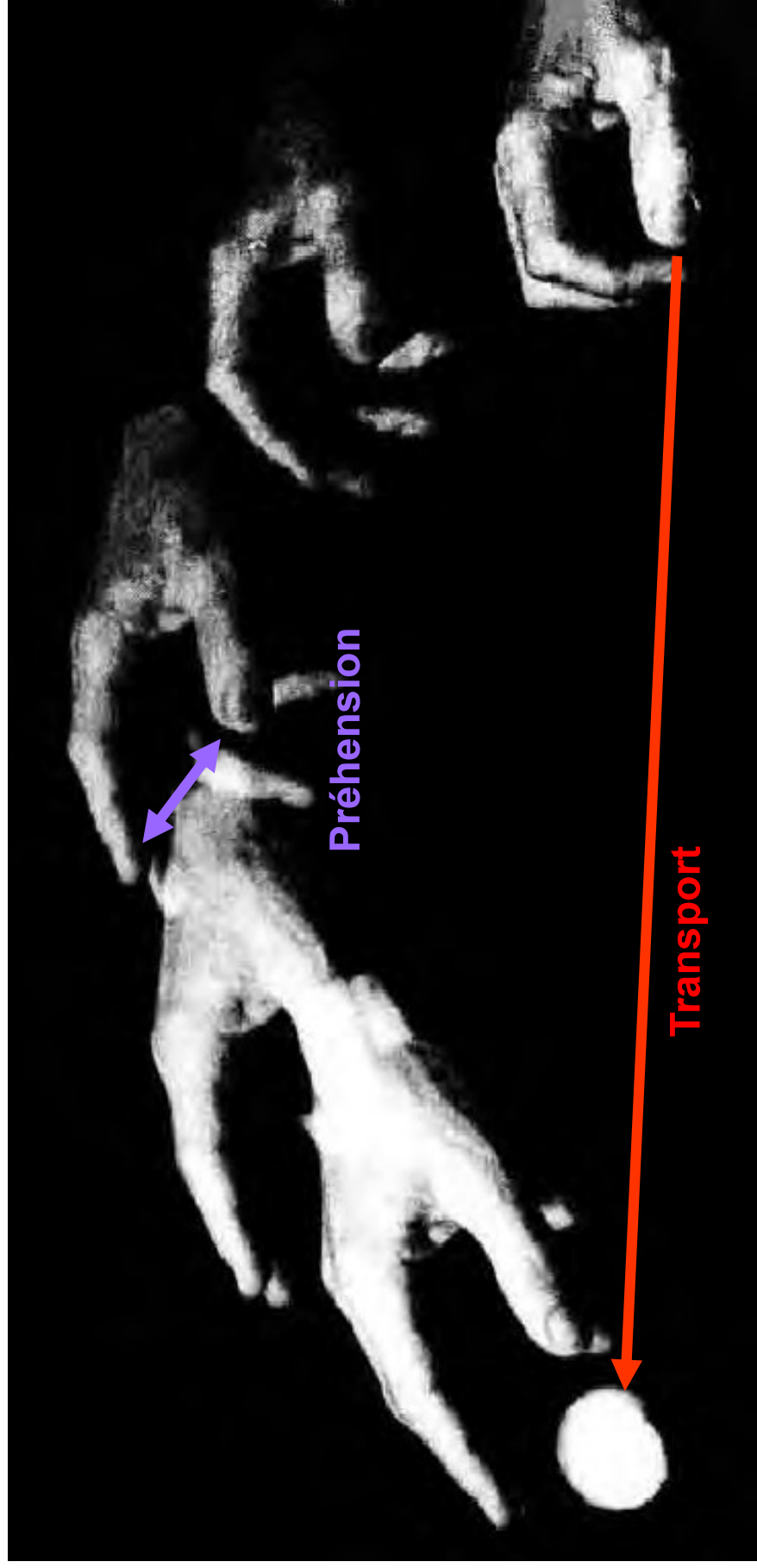


programming



			
1—1 1/2 years Cylindrical Grasp	2—3 years Digital Grasp	3 1/2—4 years Modified Tripod Grasp	4 1/2—7 years Tripod Grasp

Le geste de préhension

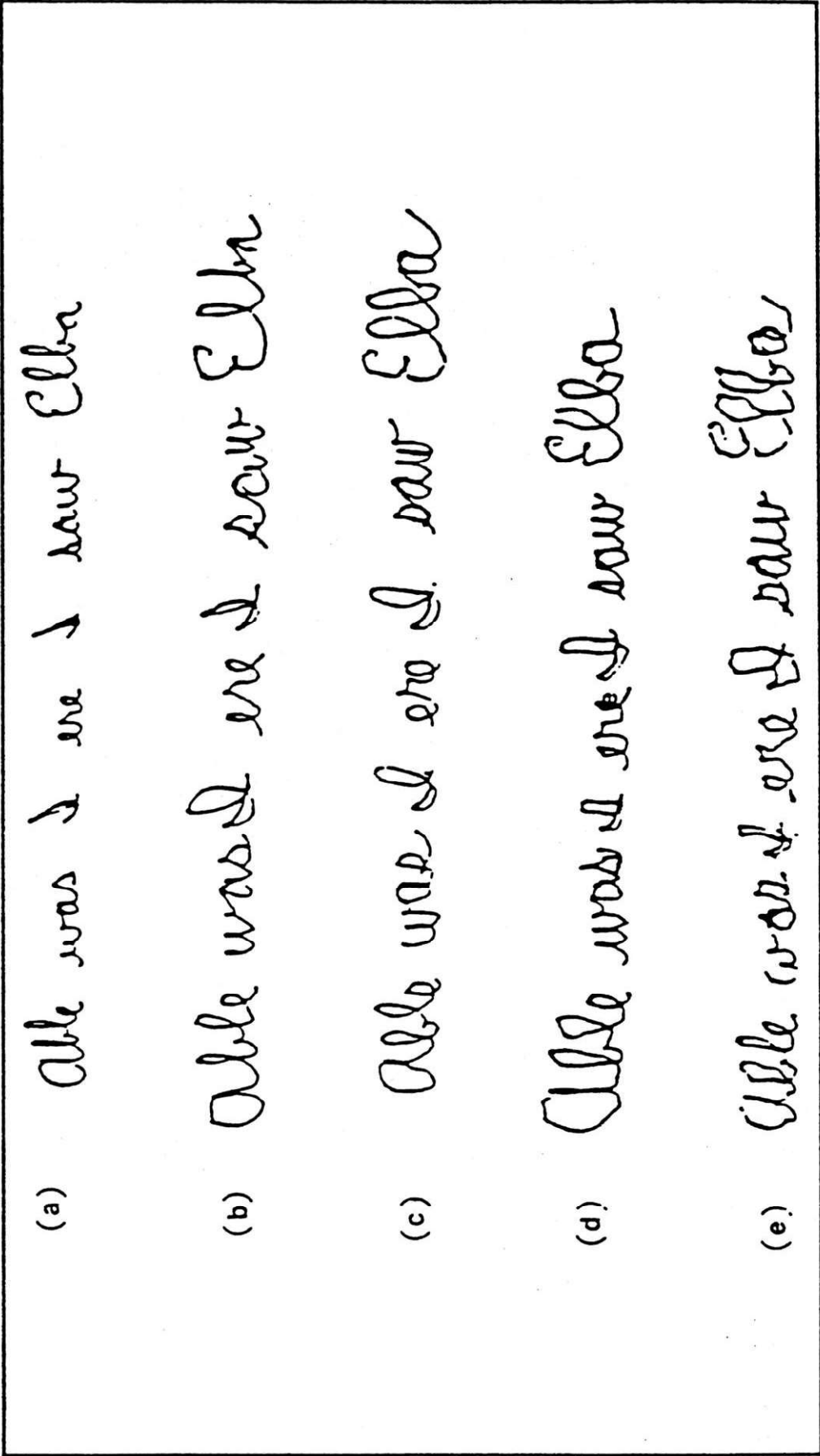


Jeannerod 1986

Le programme moteur

programmation

Exemples de traces graphiques produites par une même personne en utilisant (de haut en bas) la main droite, le bras droit, la main gauche, la bouche et le pied (d'après Raibert, 1977).

- 
- (a) Alle was ik zie saw Elba
- (b) Alle was ik zie saw Elba
- (c) Alle was ik zie saw Elba
- (d) Alle was ik zie saw Elba
- (e) Alle was ik zie saw Elba

Le programme moteur

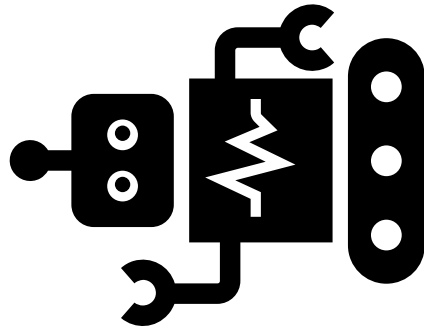
Mémoire centrale de l'organisation du geste:
contient les schèmes moteurs.

Paramètres requis:

Localisation de **la main**: effecteurs moteurs

Localisation **du but**: effecteurs sensoriels

Localisation des effecteurs sensoriels



=> Vision + sens de la position

Le programme moteur

Mémoire centrale de l'organisation du geste:
contient les schèmes moteurs.

Paramètres requis:

Conditions initiales: effecteurs moteurs

Localisation du but: effecteurs sensoriels

Analyse du but (forme, taille, orientation, texture, ...)

Prédictions (poids, fragilité, friction, température...)

+ contraintes de vitesse, séquences, obstacles,...

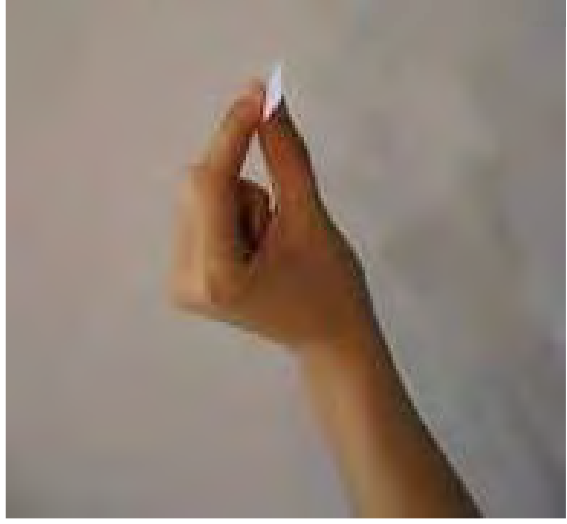
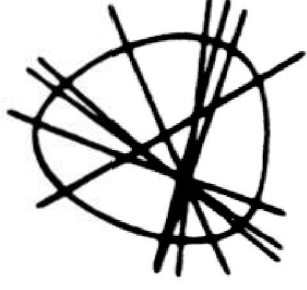
Paramètres du mouvement:

Séquence, chronologie, intensité des activations musculaires

programmation

Calcul centre de gravité => analyse implicite de la forme

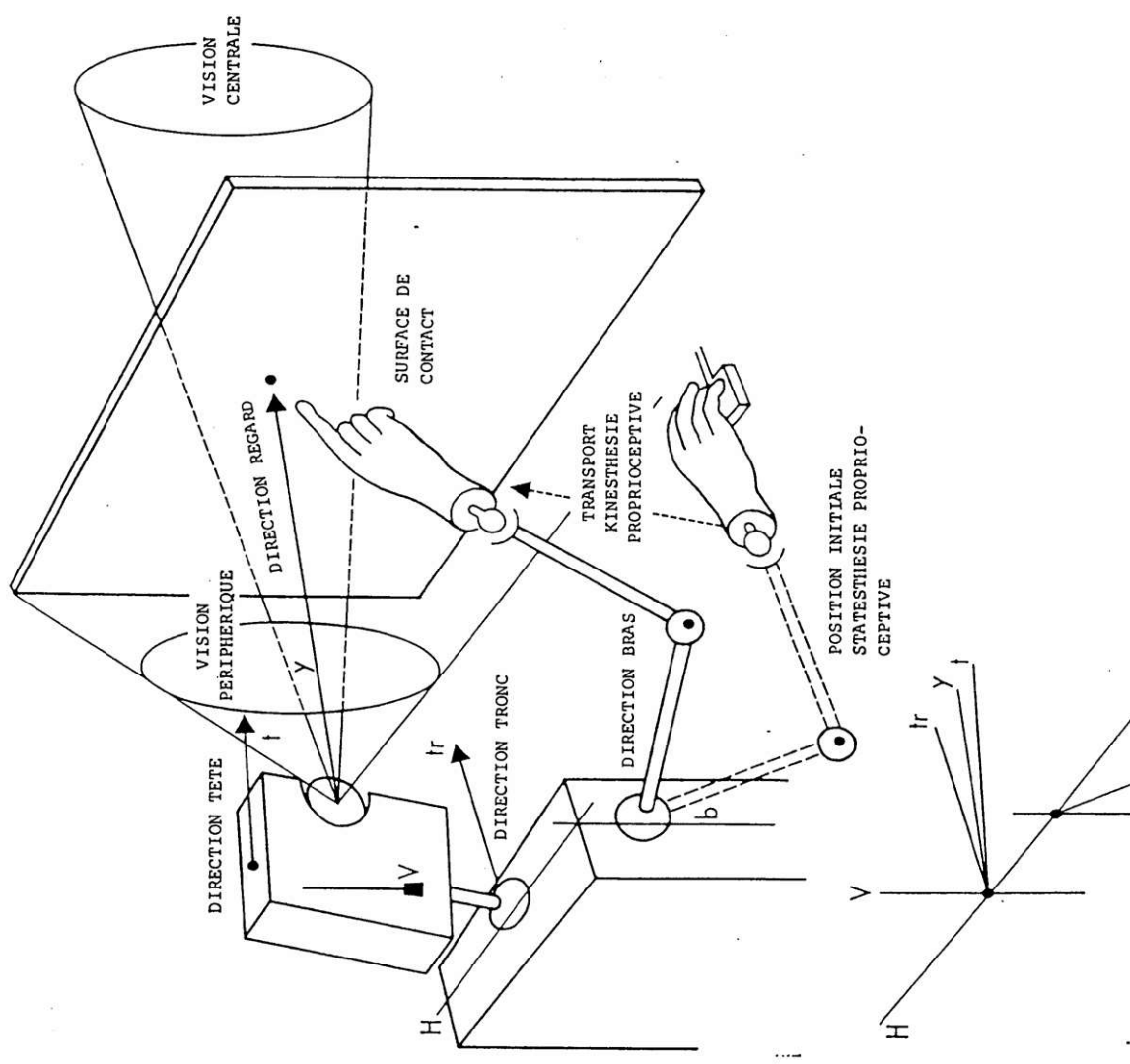
Saisie entre pouce
et index



Transformations sensori-motrices

Quel(s) référentiel(s)
spatiaux et
temporels???

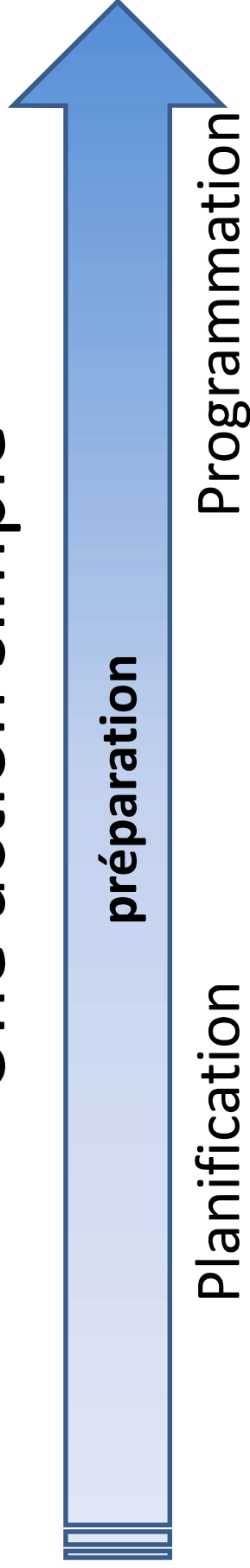
Chaque modalité sensorielle a
un timing différent !
+ Les timings & distance sont
estimés conjointement



Planification

Quoi faire ?

Une action simple



Sélections

Organisation

du but



vision



de l'effecteur



vision & proprioception

How many intentions?

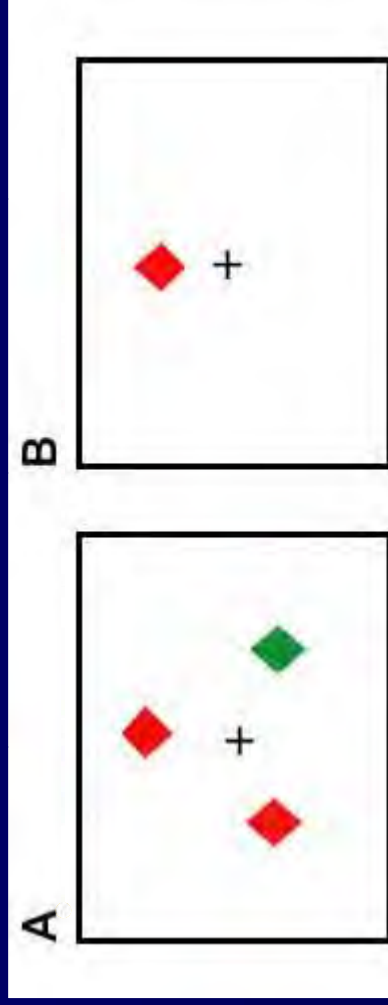
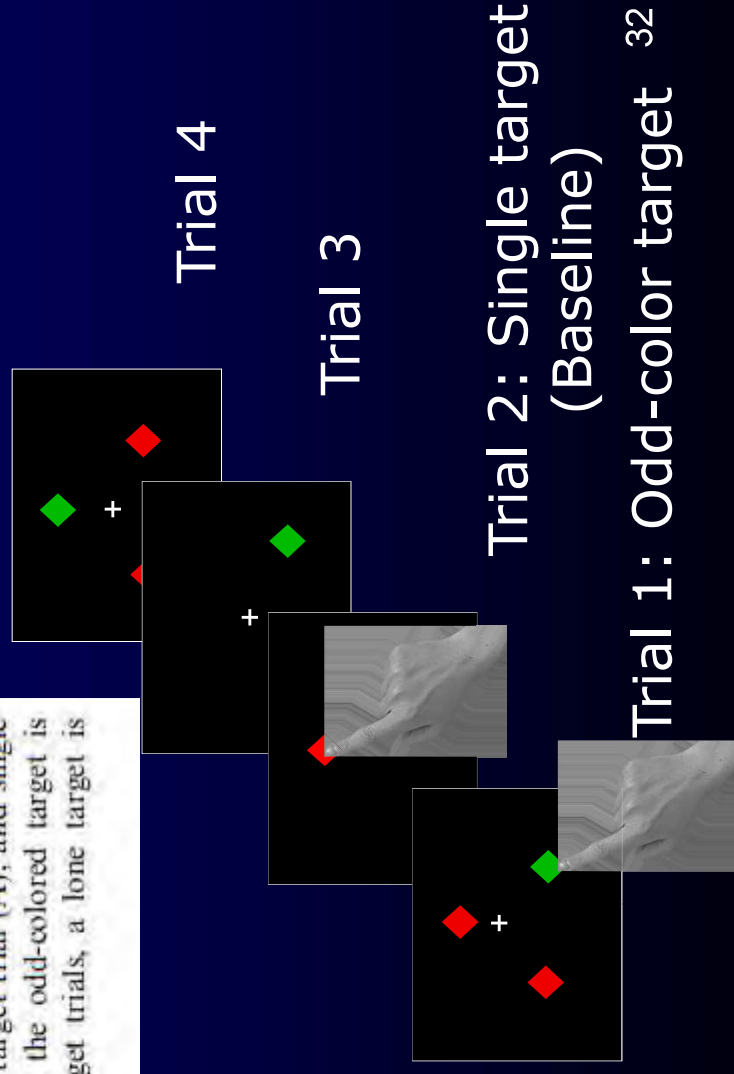
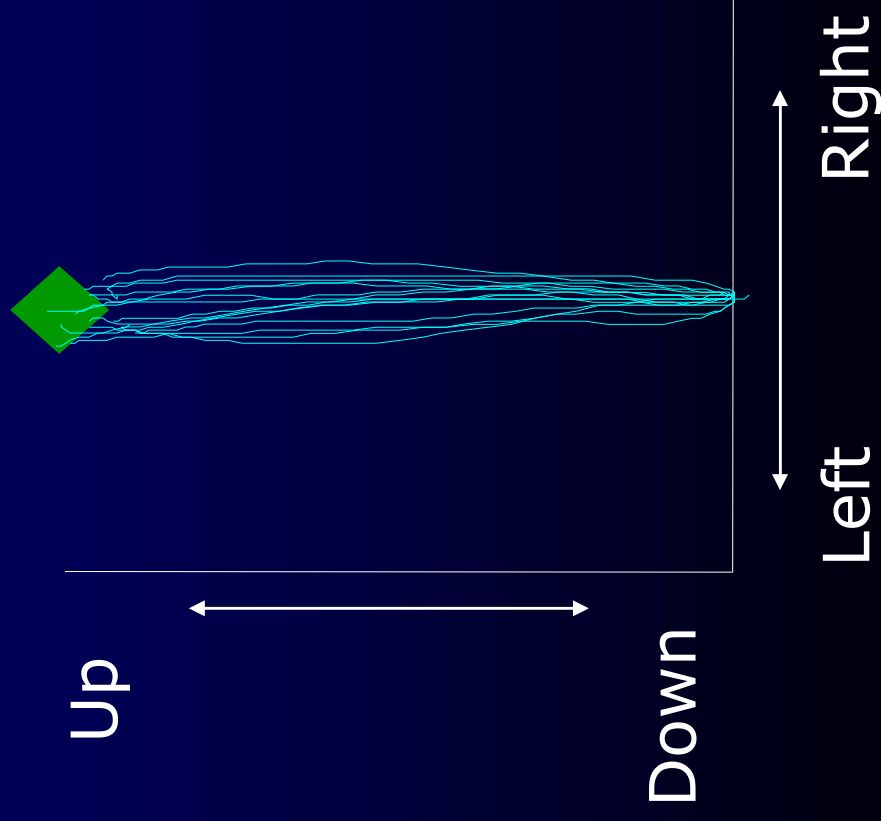


Fig. 1. Schematic diagram of an odd-colored target trial (A), and single target trial (B). In odd-colored target trials, the odd-colored target is presented with two distractors. In single target trials, a lone target is presented without distractors.



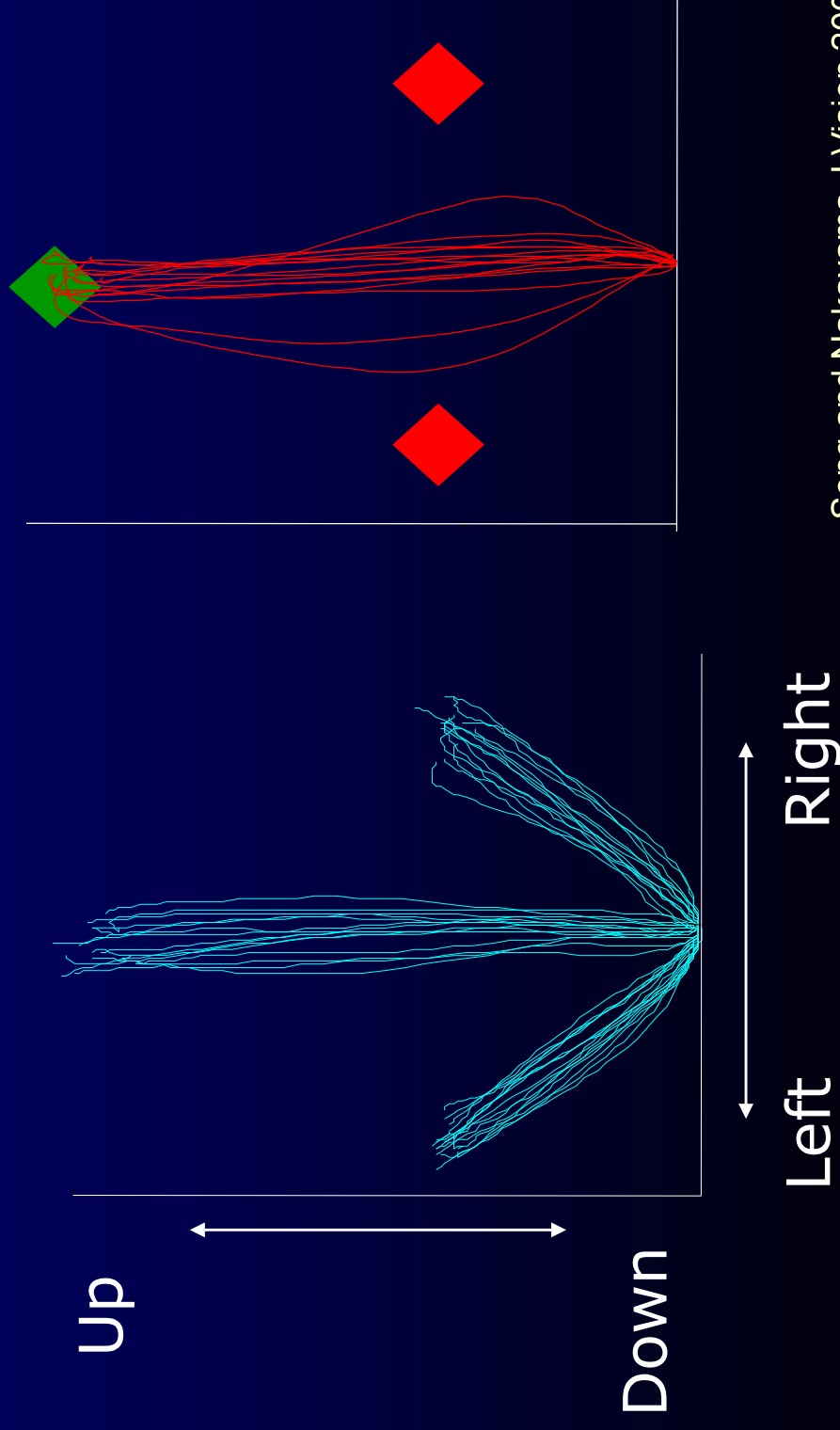
Movement Trajectories: Single Target

Single target trials



Trajectoire des mouvements: Pointer sur la cible différente des autres

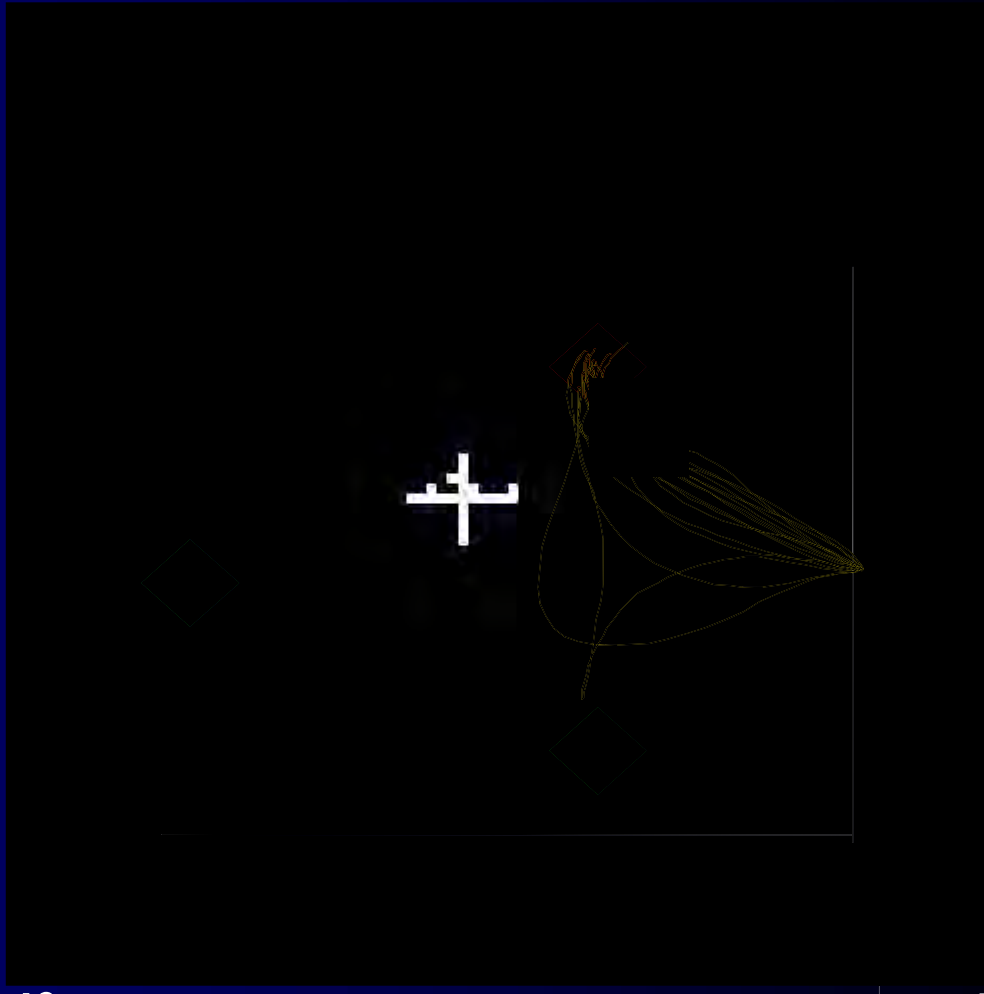
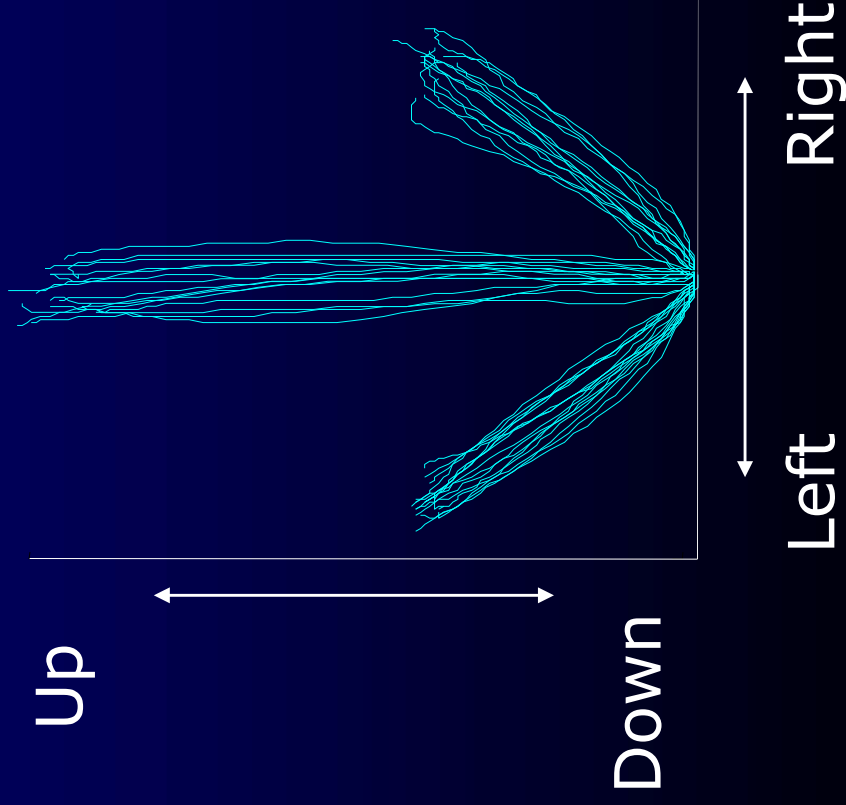
Single target trials Odd-color target trials



Trajectoire des mouvements.

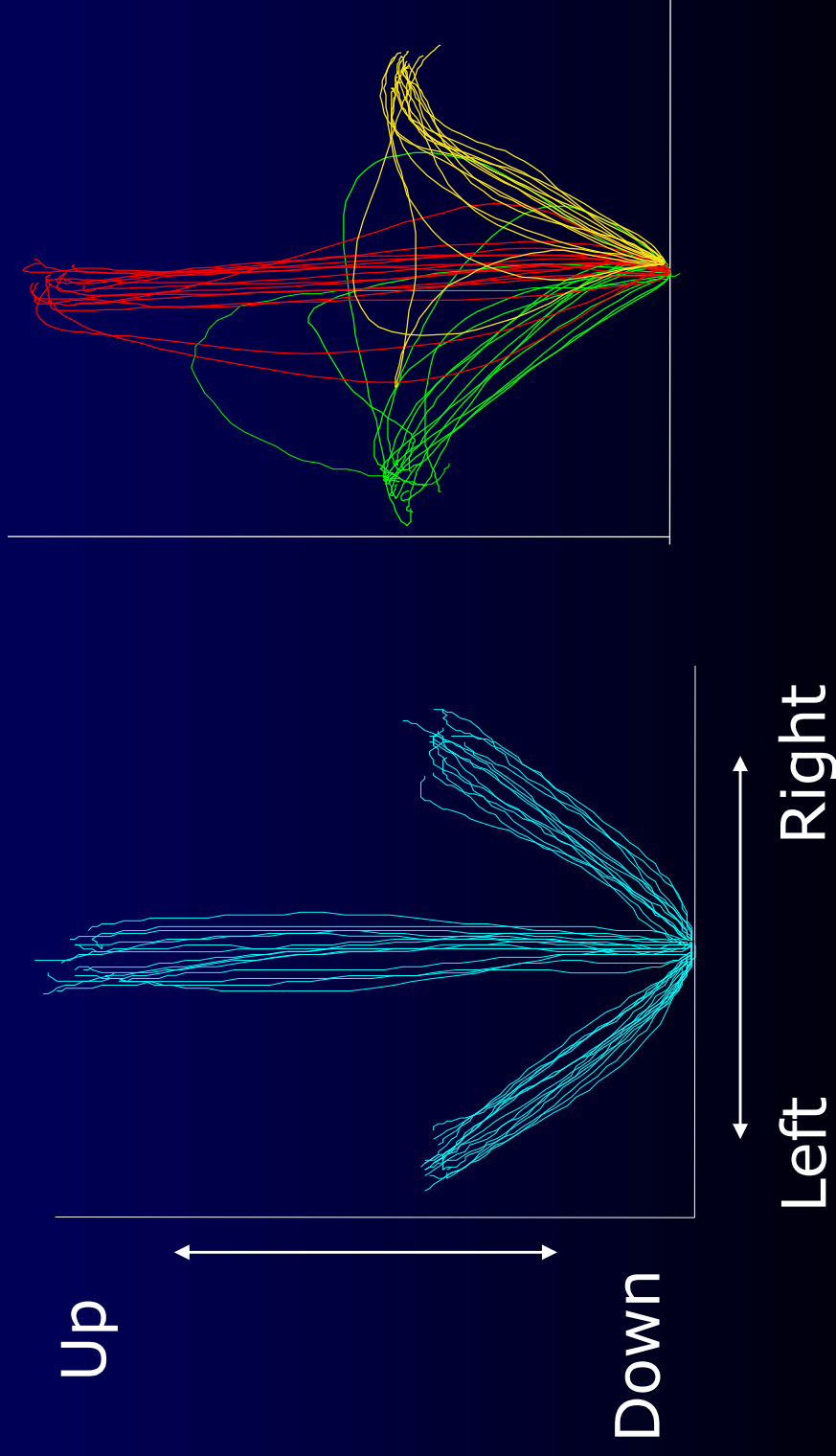
Pointer sur la cible différente des autres

Single target trials



Trajectoire des mouvements. Pointer sur la cible différente des autres

Single target trials Odd-color target trials



Est-ce que les mouvements initiaux et correctifs sont planifiés de manière concomitante ?

planification

- Curved trajectories
 - Influences of competing distractors on planning & execution of pointing movements
- Are initial & corrective movements concurrently planned, overlapping in time?
- Difficulty of decomposing curved trajectories into discrete two movements

Sélection et attention

En présence de plusieurs buts possibles, ou de plusieurs effecteurs possibles, cas le plus fréquent,

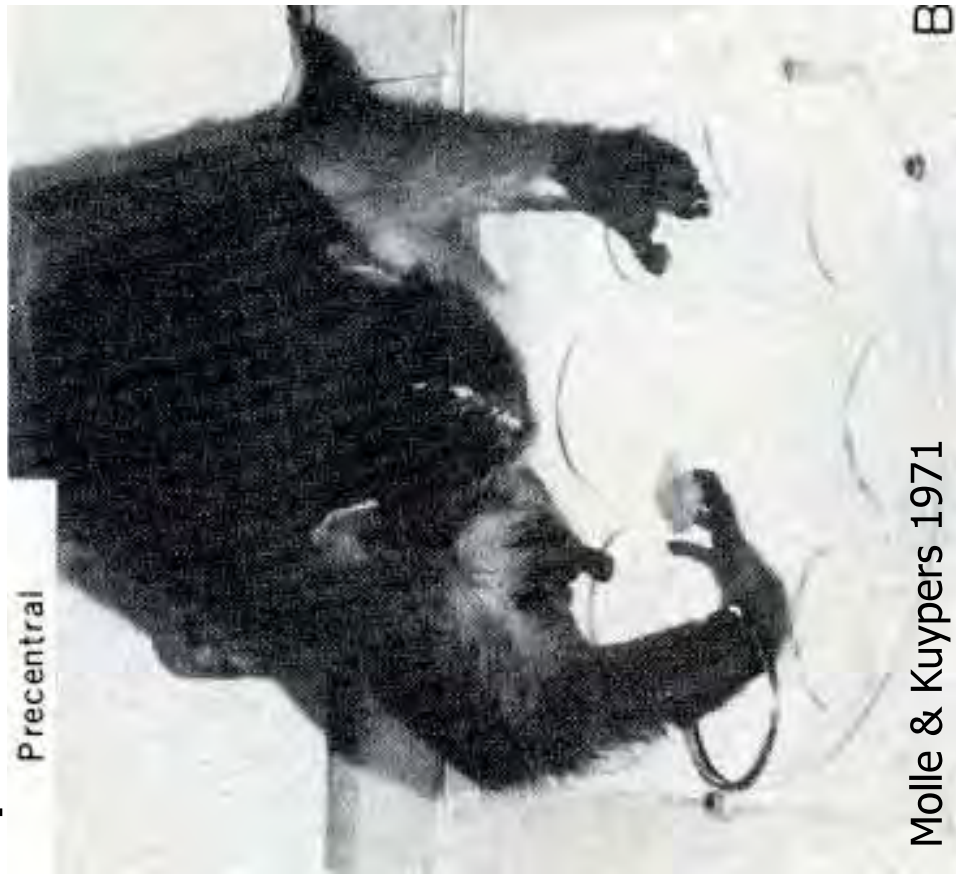
le système moteur active plusieurs réponses simultanément par défaut

et doit **sélectionner** la bonne réponse par compétition entre les candidates (i.e. inhibition ou activation relative)

Planification: le cortex prémoteur

planification

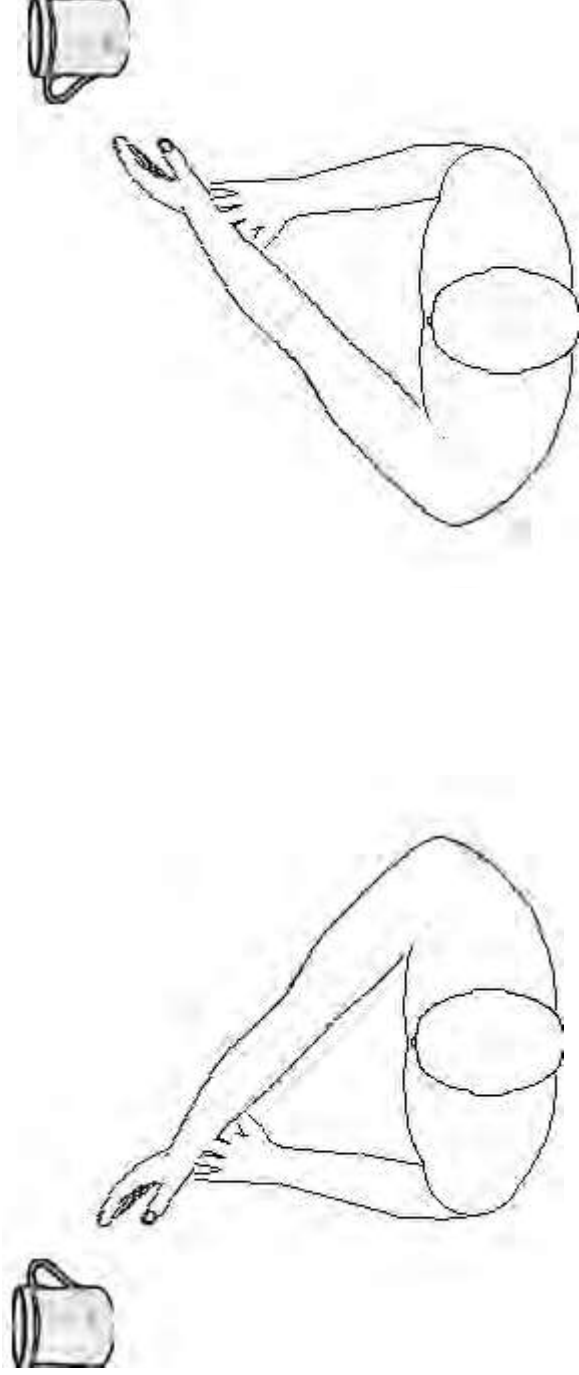
Inhiber + planifier



Molle & Kuypers 1971

Test des tasses de Humphreys

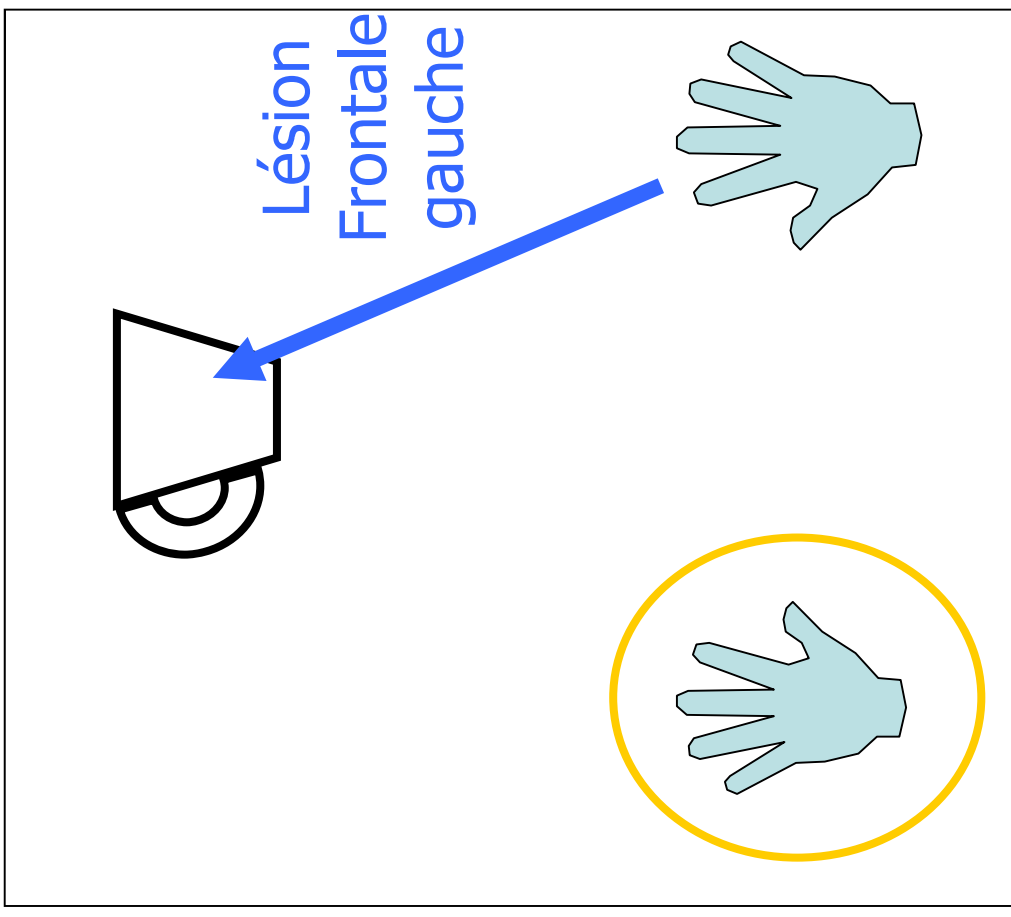
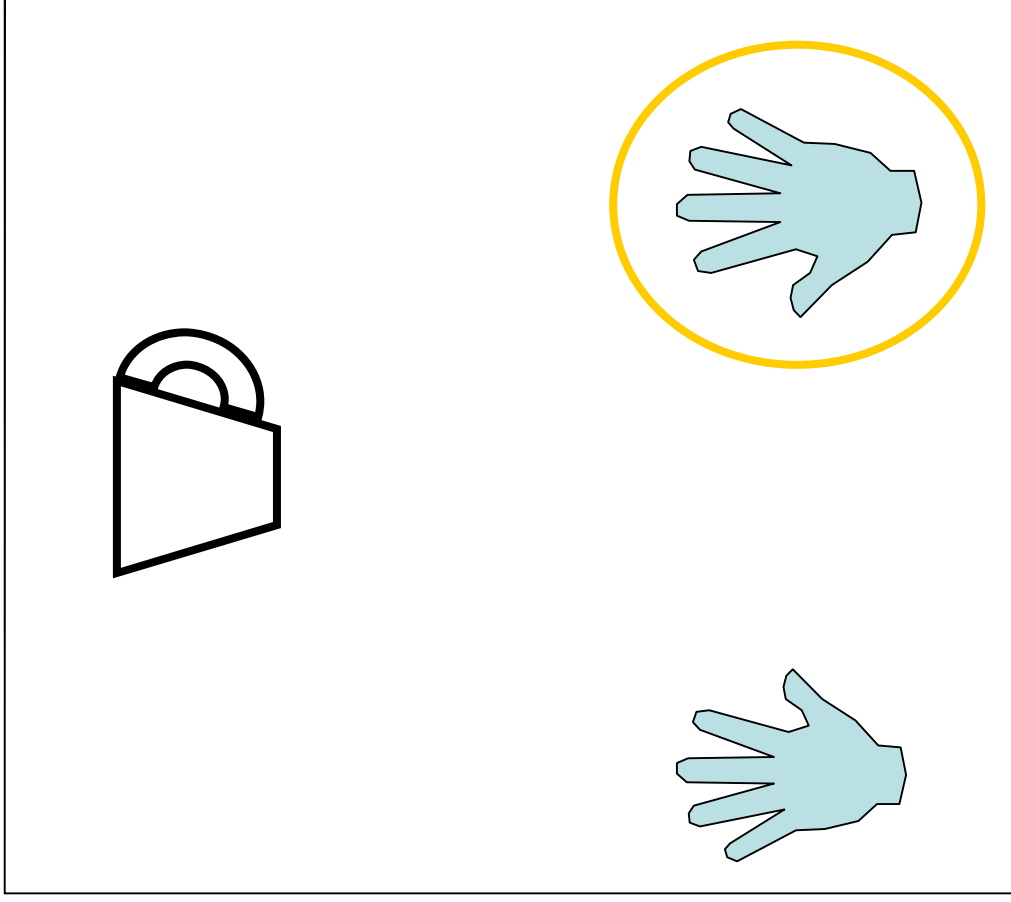
sélection de l'effecteur et du but



« prendre la tasse par la anse »

Test des tasses de Humphreys

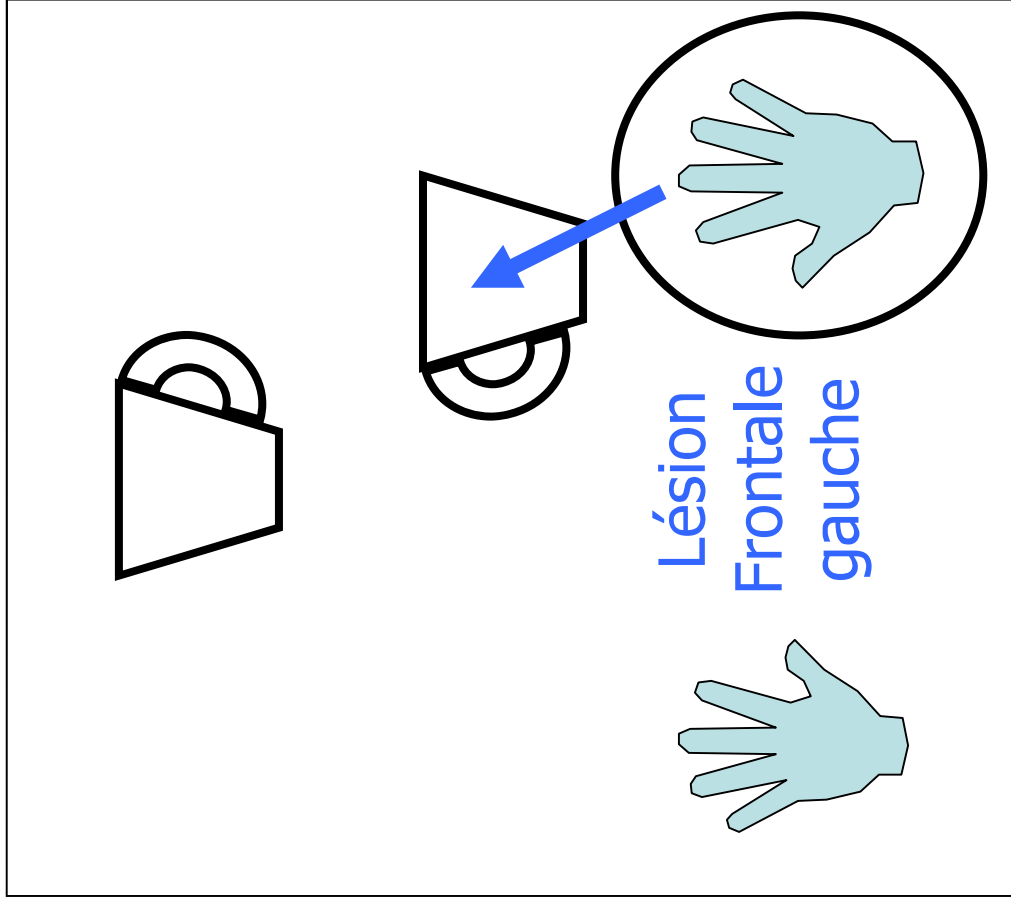
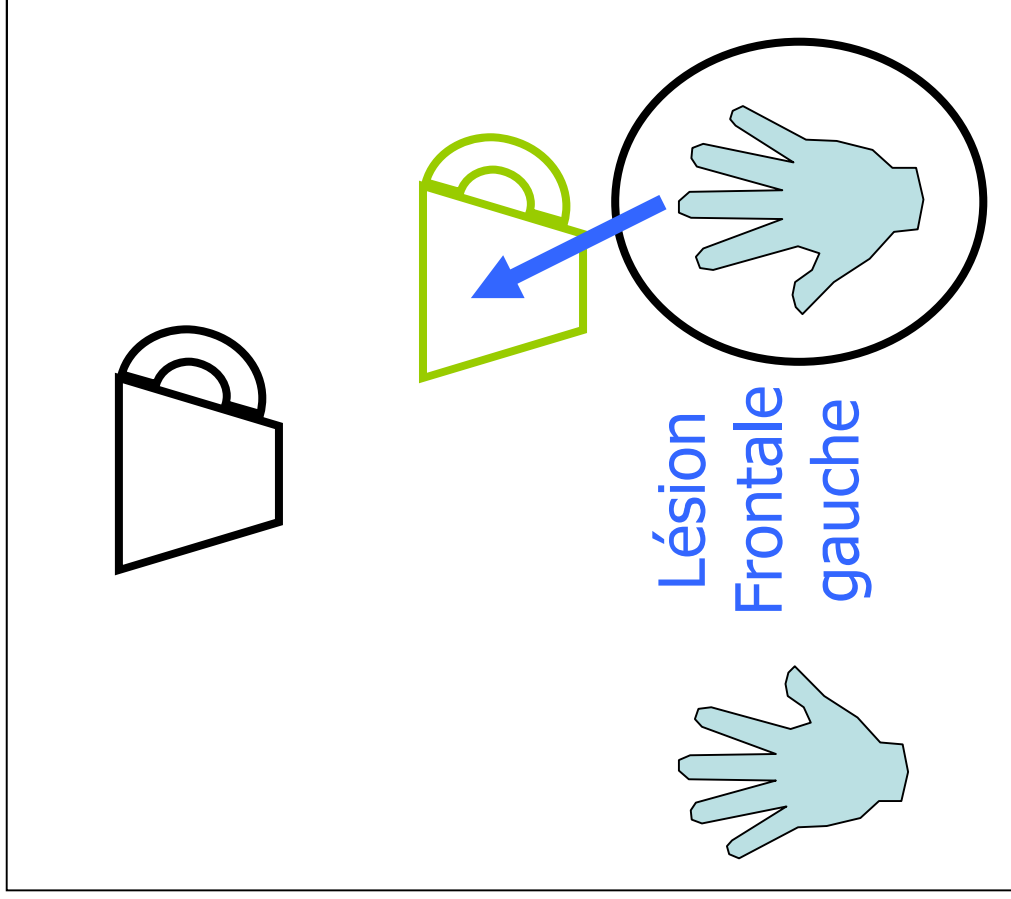
Riddoch & Humphreys 2001, Humphreys et al. 2002



=> Effet main: l'objet « sélectionne » la main

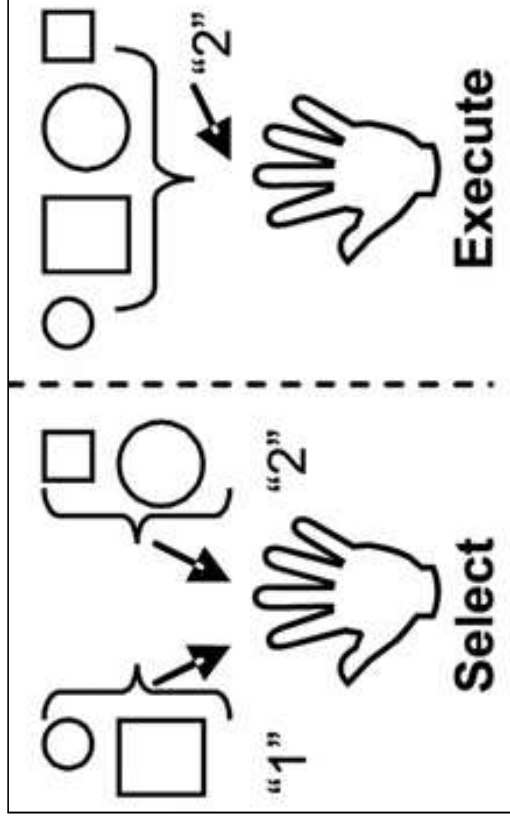
planification

Test des tasses de Humphreys: distracteur



=> Effet distracteur: la main active est capturée par le distracteur

Sélection : Cortex pre-moteur (gauche)



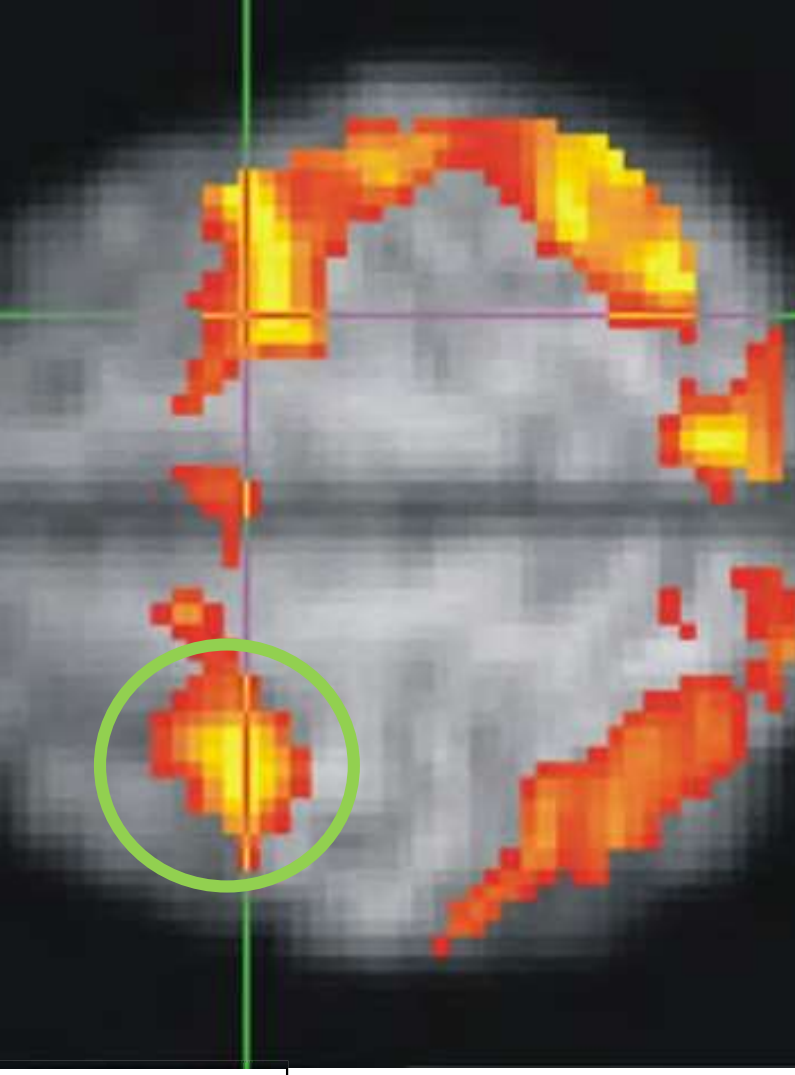
Behavioral tasks. In both tasks, a shape was presented on each trial.

In the experimental **select task**, subjects pressed button 1 (index finger) in response to a large square or a small circle and button 2 (middle finger) in response to a large circle or a small square.

In the control **execute task**, subjects pressed the same button with the same finger in response to every shape.

Action Selection Network

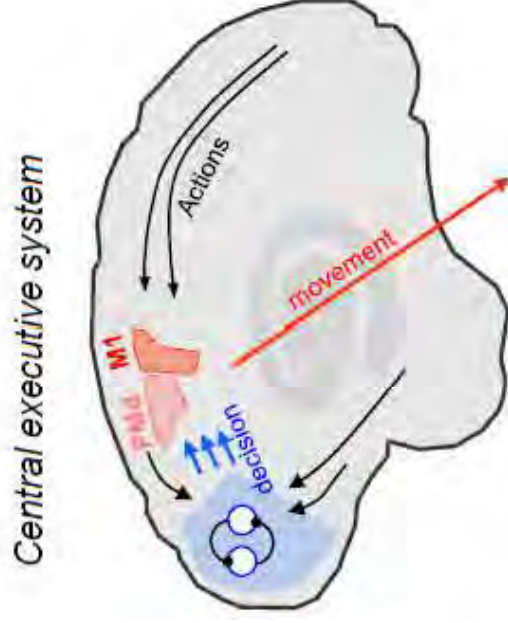
During select as opposed to execute task performance (select > execute), subjects activated a **bilateral premotor-parietal network**. There was a trend toward stronger and more spatially extended activity in **left PMd** than right PMd.



Select – Execute activation

Sélection : réseaux cortico - sous-corticaux

Ce qui se passe au niveau frontal est le résultat de boucles circulaires cortico-sous-corticales



Padoa-Schioppa (2011) *Annu Rev Neurosci*



Gold and Shadlen (2007) *Annu Rev Neurosci*
Cisek & Kalaska (2010) *Annu Rev Neurosci*



Mink (1996) *Prog Neurobiol*
Redgrave et al. (1999) *Neuroscience*

Une action complexe

planification

préparation

Planification

Programmation

Organisation

sélections

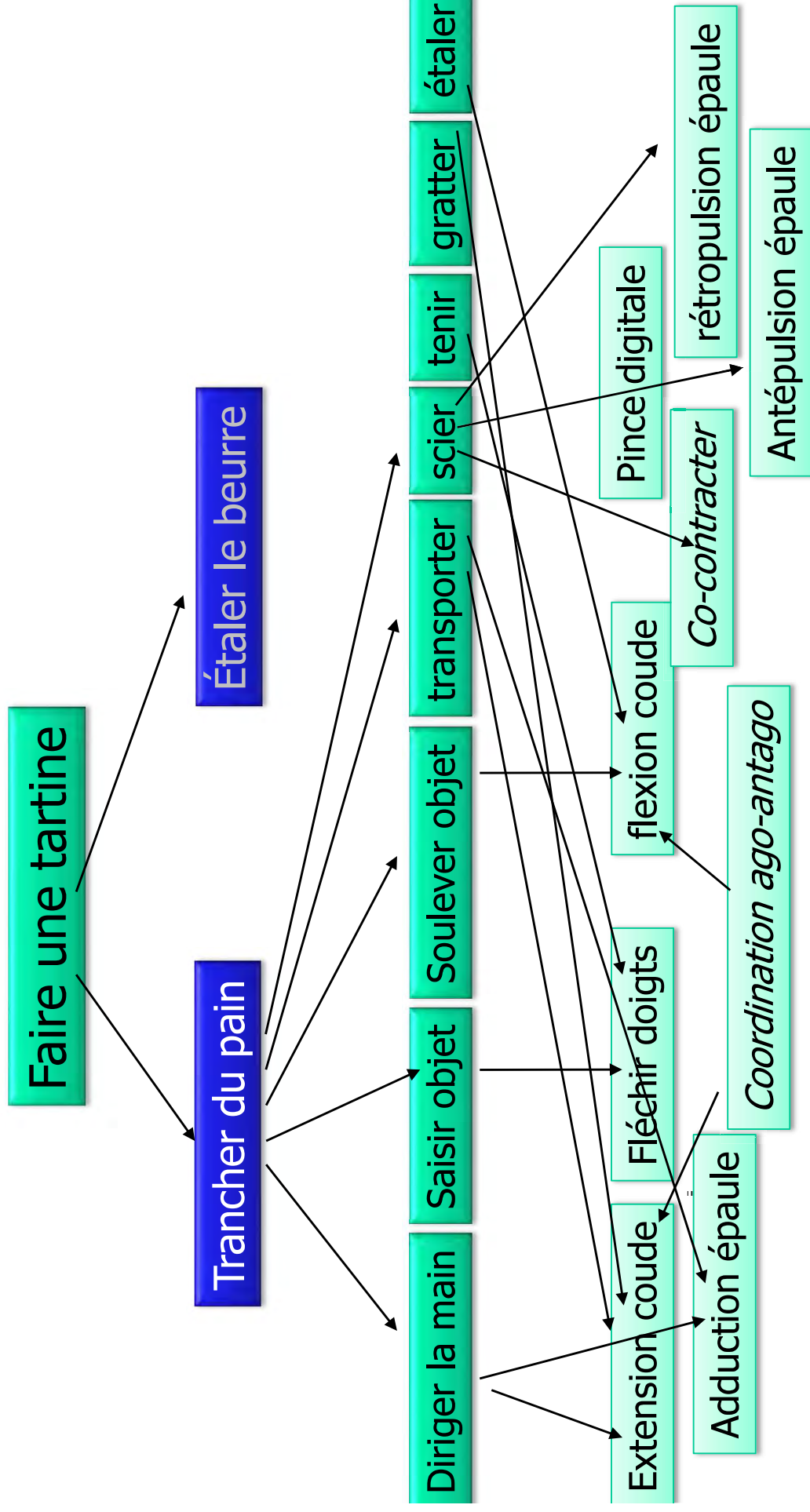
Séquences
Coordinations
Outils



planifier une action: exemple

planification

(schéma très incomplet!)



N.B. chaque élément est lui-même source d'informations sensorielles !

L'apraxie idéo-motrice

Difficulté ou impossibilité d'exécuter volontairement,
sur ordre ou sur imitation,
des mouvements nécessaires à la réalisation
d'un geste à valeur **symbolique** ou expressive



L'apraxie idéatoire

Difficulté ou impossibilité de réaliser
une tâche acquise, simple ou complexe,
avec des **objets**



Nouvelles définitions de l'apraxie

L'**apraxie des membres** désigne l'incapacité de réaliser des mouvements complexes et/ou des actions apprises, soit sur instruction soit en imitation. Ceci en l'absence de troubles sensori-moteurs ou cognitifs interférant avec la compréhension de la tâche ou le traitement des stimuli.

Différentes formes d'apraxie des membres sont distinguées en fonction des tâches et de la nature de l'action à réaliser. Dans chaque forme le déficit est bilatéral quelque soit l'hémisphère cérébral lésé.

- 1. **Difficultés d'utilisation des objets**: de sélectionner les outils quotidiens appropriés et/ou de réaliser l'action nécessaire pour réaliser la tâche. Les erreurs peuvent aussi concerner comment l'outil est pris en main ou orienté dans l'espace.
- 2. difficultés pour réaliser des **gestes symboliques sur commande**. Les erreurs peuvent inclure de la perplexité, des substitutions sémantiques et des distorsions spatio-temporelles.
- 3. difficultés pour reproduire **par imitation des gestes et/ou postures significatives ou sans signification**. Alors que les gestes peuvent être retrouvés en mémoire à long-terme, l'imitation des gestes sans signification requiert de convertir l'information visuelle en programme moteur et de conserver en mémoire le modèle à reproduire.
- 4. difficultés pour **produire sur commande ou d'imiter des mimes**. Les erreurs peuvent impliquer l'action (perplexité, substitutions sémantiques ou distorsions spatio-temporelles), la configuration manuelle (postures inadéquates pour tenir l'objet imagine) et/ou les fonctions symboliques (ls parties corporelles comme des objets).
- La lésion cérébrale implique généralement l'hémisphère gauche, les lésions caléuses produisent une apraxie unilatérale affectant généralement les membres gauches.

L'origine de l'action

apathie

désinhibition

Inhibition de la réponse par défaut

Élaboration de une ou plusieurs actions

Sélection d'une réponse appropriée

Contrôle moteur

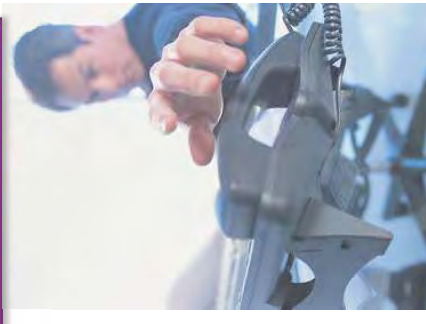
Ajustement en temps-réel

De multiples contrôles
pour une simple action

Pendant

exécution

Contrôle moteur



Vision

Rétroactions

Proprioception

Proaction



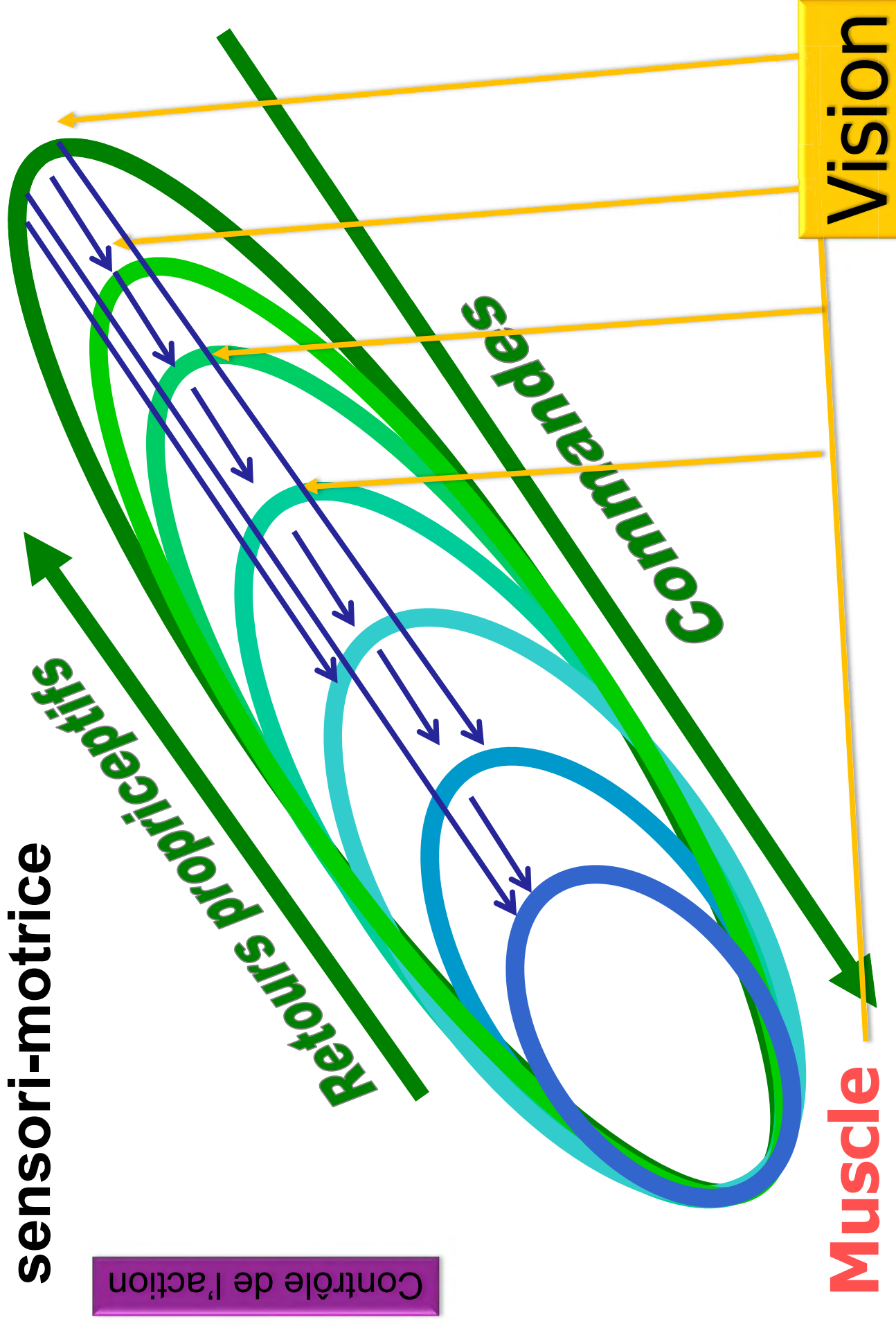
allo
centré

ego
centré



L'organisation
sensori-motrice

Intention



Contrôle de l'action

Muscle

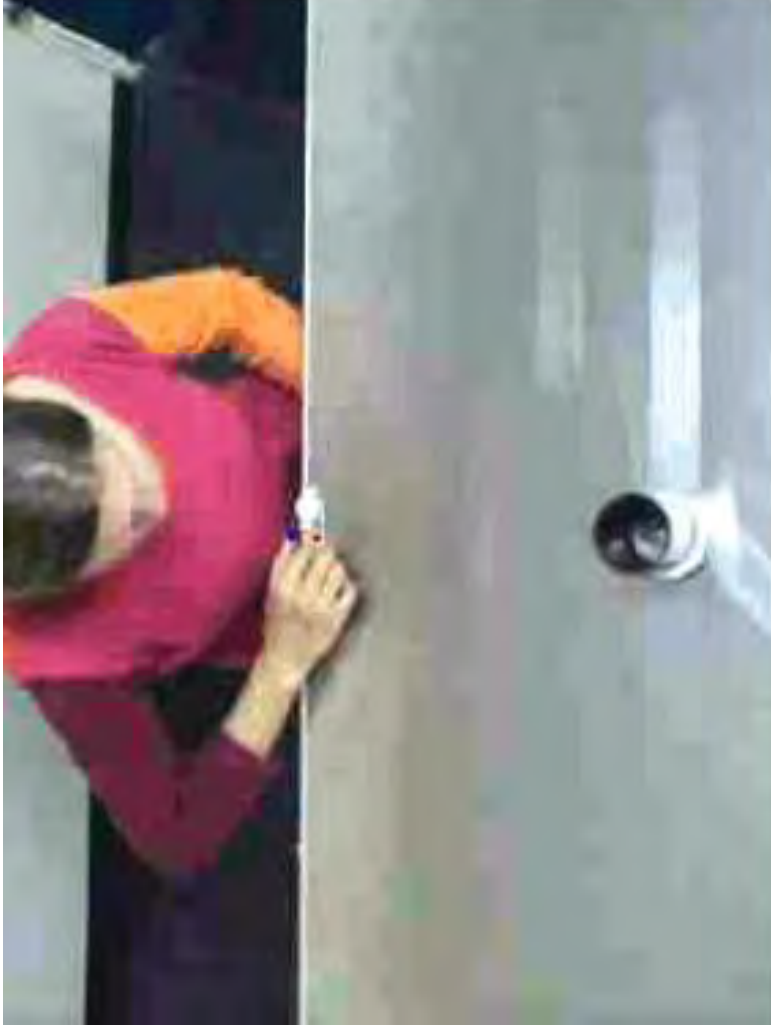
Vision

Commandes

Retours proprioceptifs

Contrôle moteur

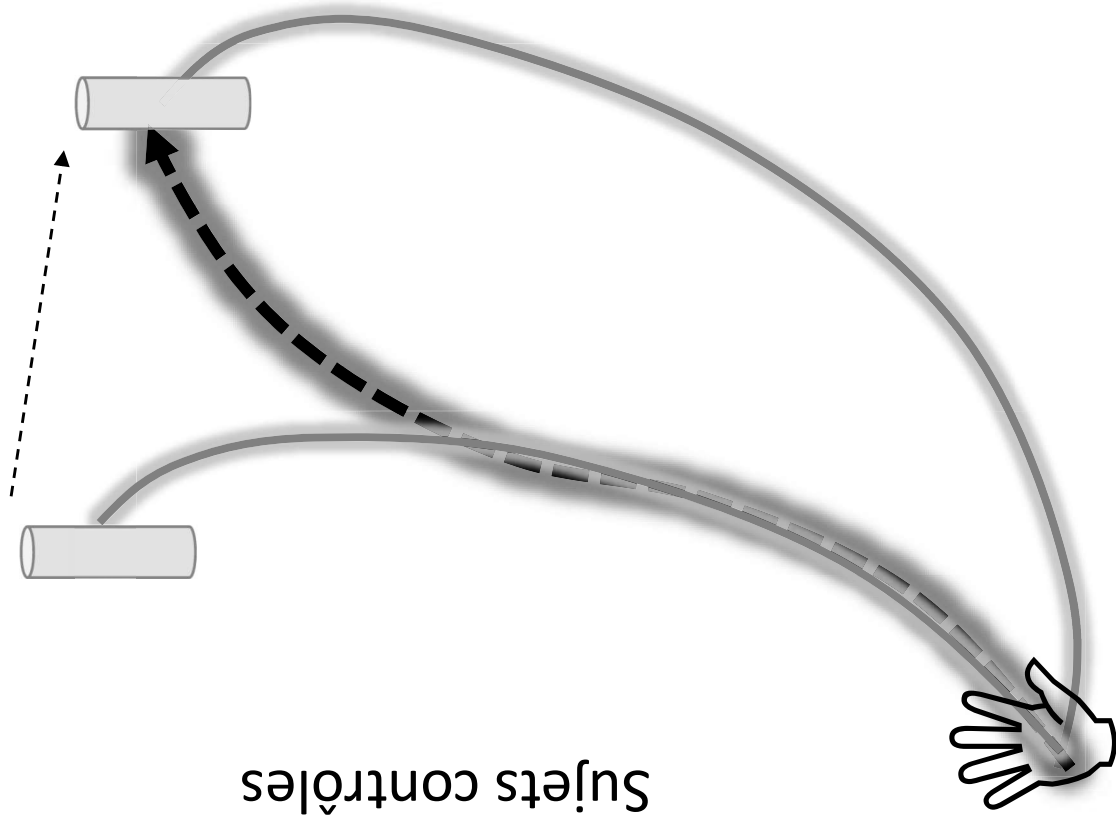
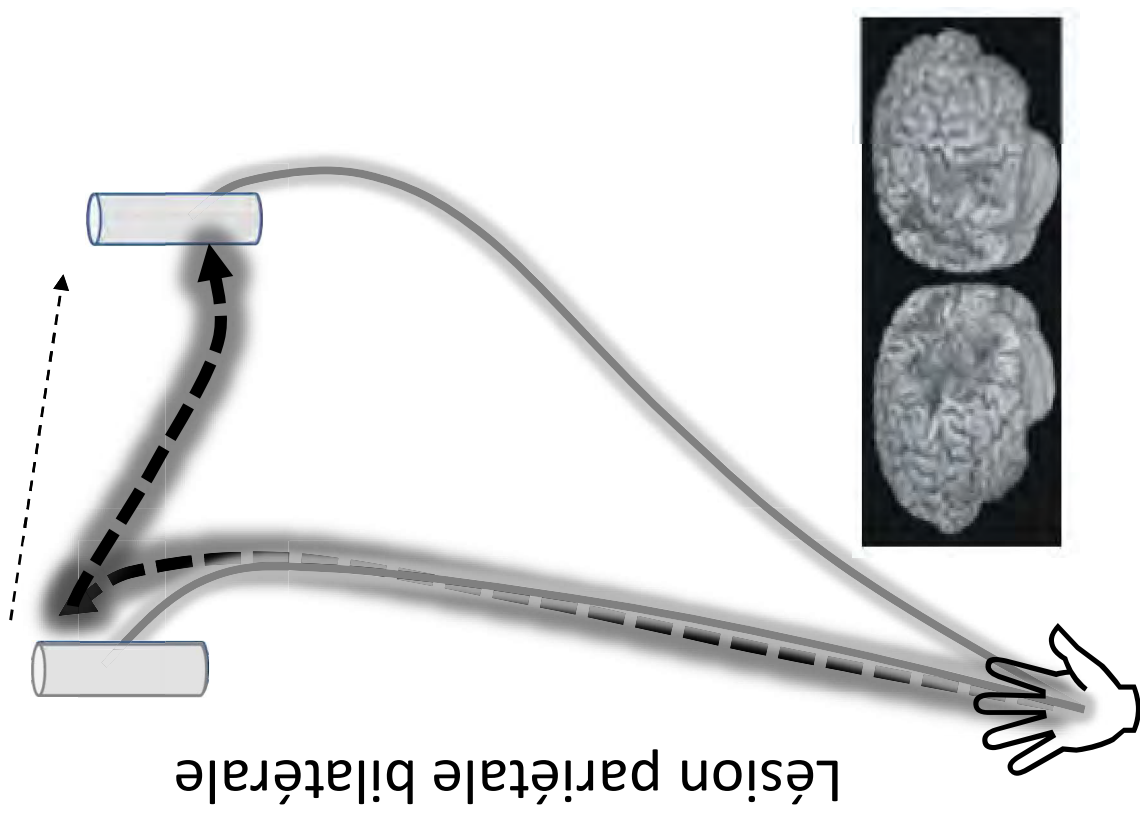
Le pilotage automatique du geste



- Mécanisme visuo-moteur
- Ultra-rapide
- Échappe à la conscience

=> source de stimulation ascendante

Contrôle moteur



→ Un **Pilote Automatique Pariétal**

Pisella et al. 2000

- Guidage immédiat de l'action
- Contraintes temporelles élevées
- Dissociable de la conscience
- Pré-configuré par l'intention
- Déclenché automatiquement

+ contribution sous-corticale (Day and Brown 2001)

Contrôle moteur

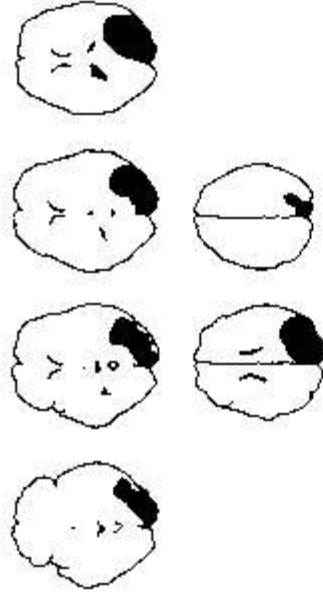
Contrôler l'action

Un guidage non conscient de l'action

la vision aveugle
l'ataxie optique

La cécité corticale

Patient JR



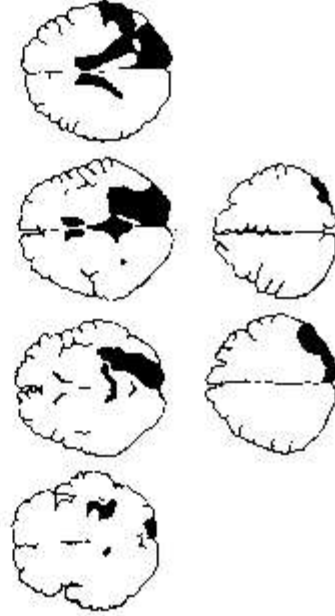
Left Eye



Right Eye



Patient YP



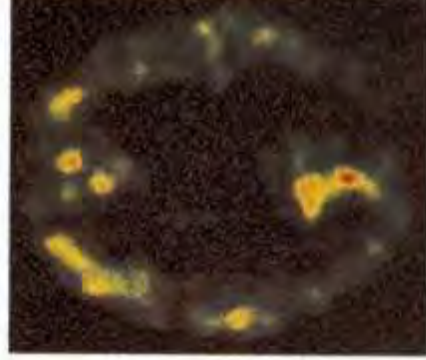
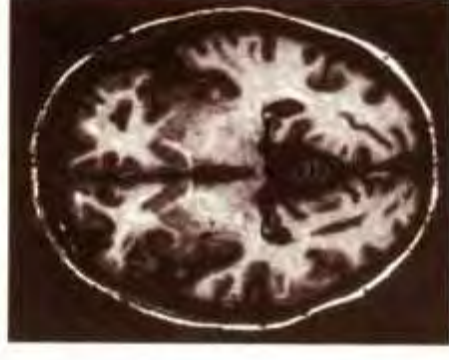
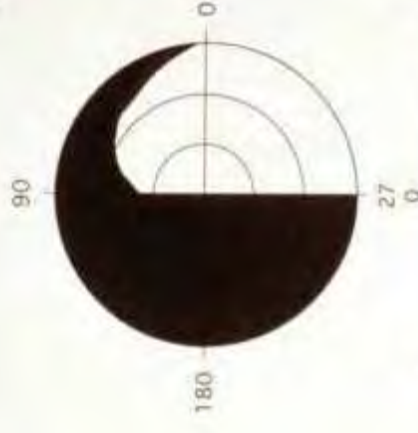
Left Eye



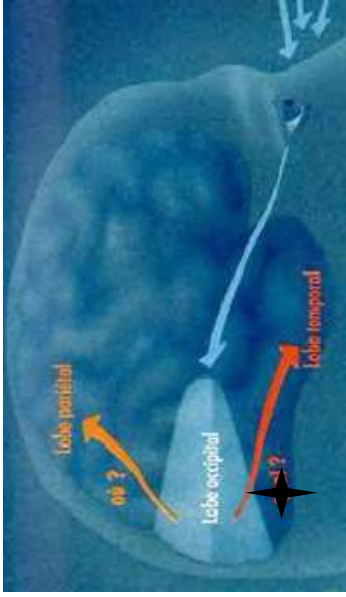
Right Eye



Danckert et al. 2005



Rossetti 1998

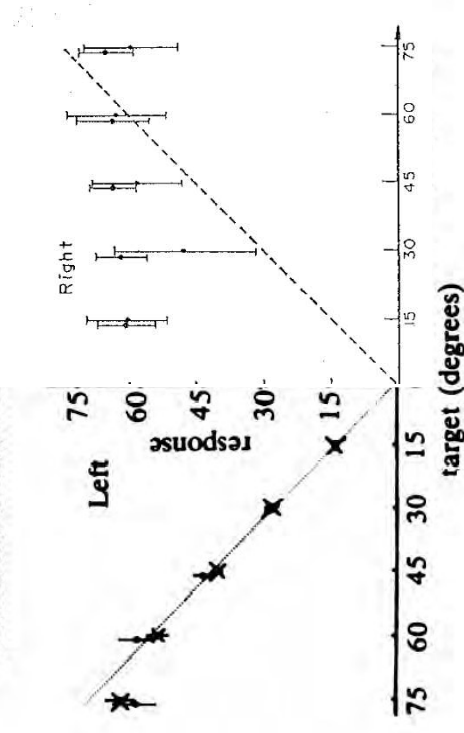
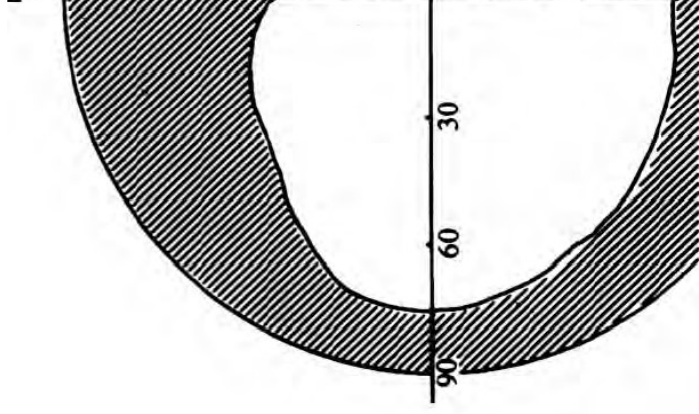


La vision aveugle
(vs l'hémianopsie latérale homonyme)

Lésion du cortex occipital (V1)
Déficit visuel controlatéral (hémianopsie)
Absence de détection des stimuli

**Capacité résiduelle de
produire des mouvements**

⇒ **L'intention** est dissociée de la
réalisation motrice

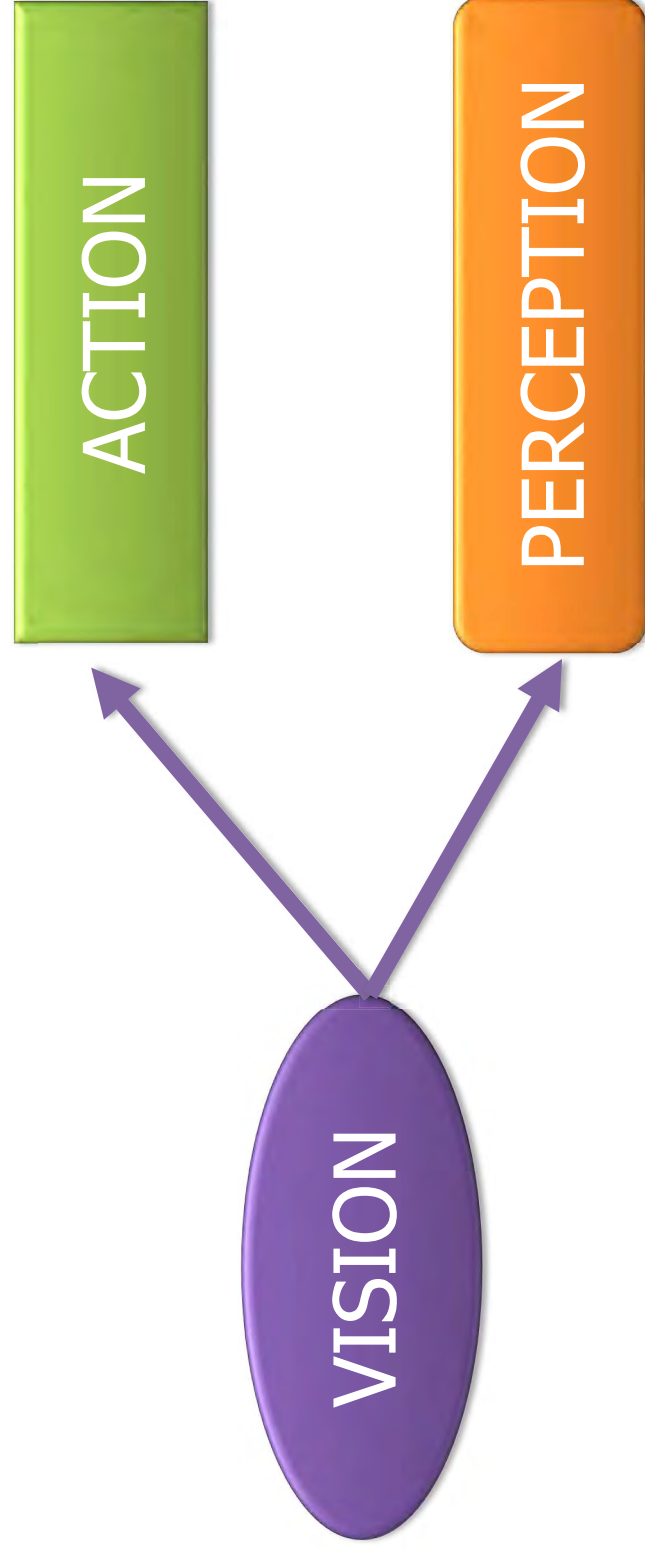


Perenin & Jeannerod 1978

Contrôle moteur

Une spécialisation visuelle

Contrôle moteur



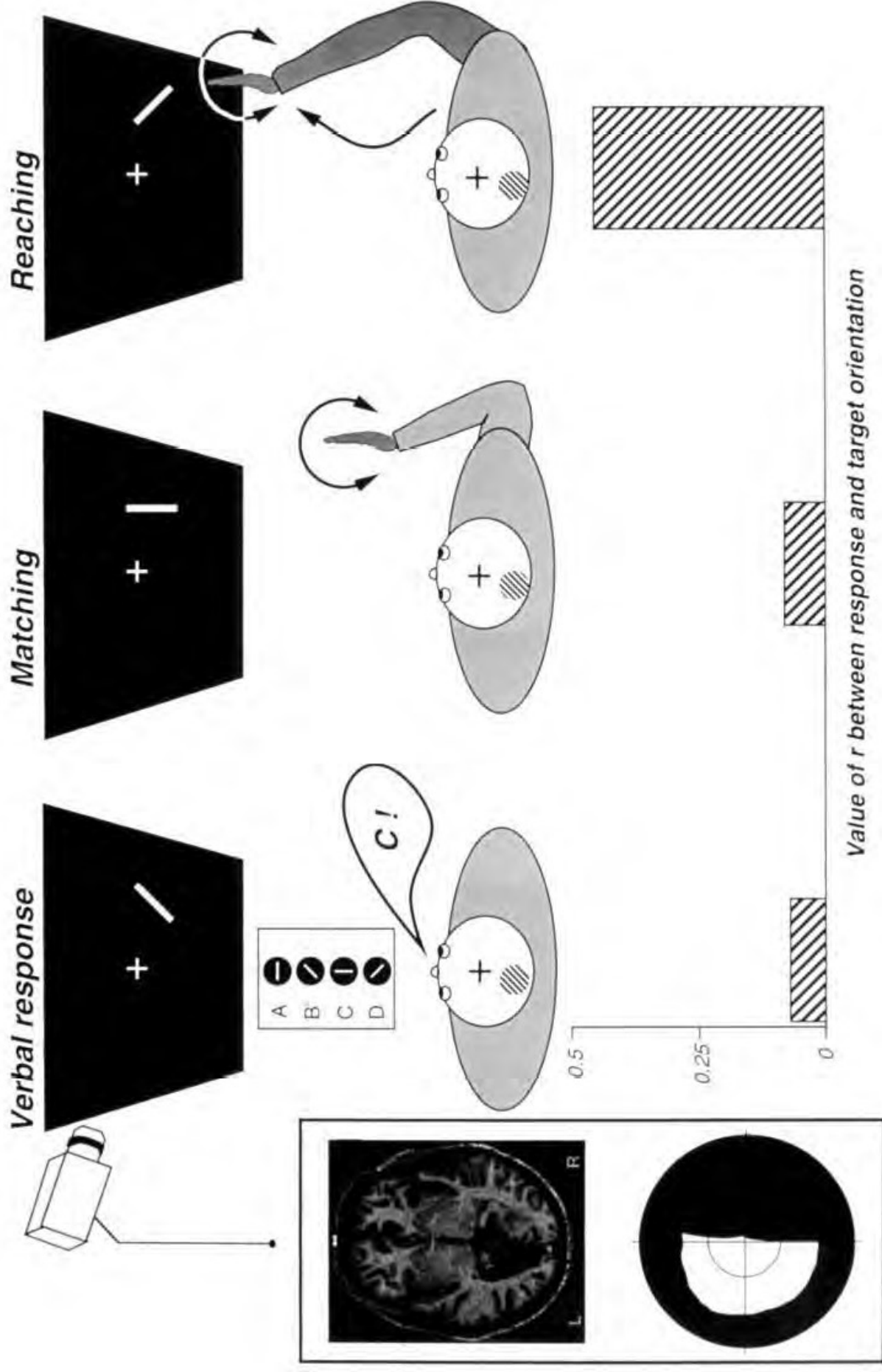
La vision aveugle

Contrôle moteur

action



Vision aveugle: codage de l'orientation et de la taille



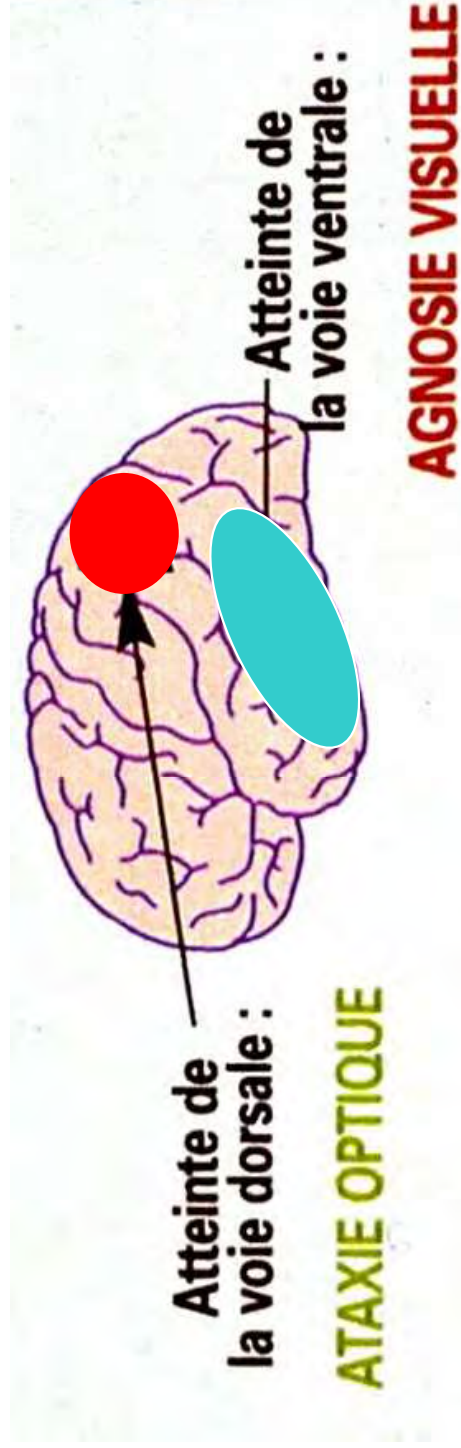
Contrôle moteur



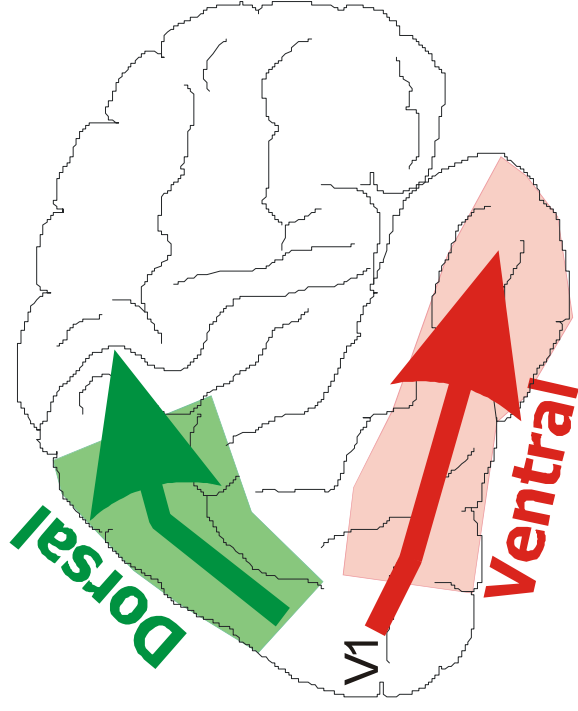
Vigetto 1980

Une double dissociation obsolète

Contrôle moteur



Une spécialisation visuelle ?



VISION

Contrôle moteur

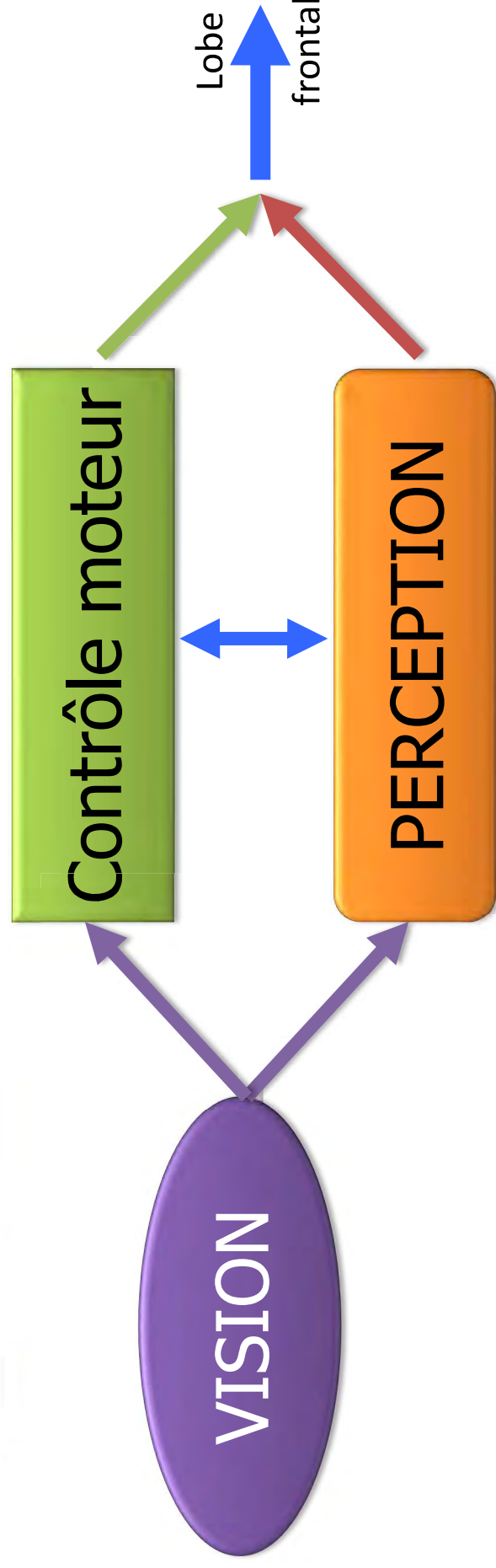
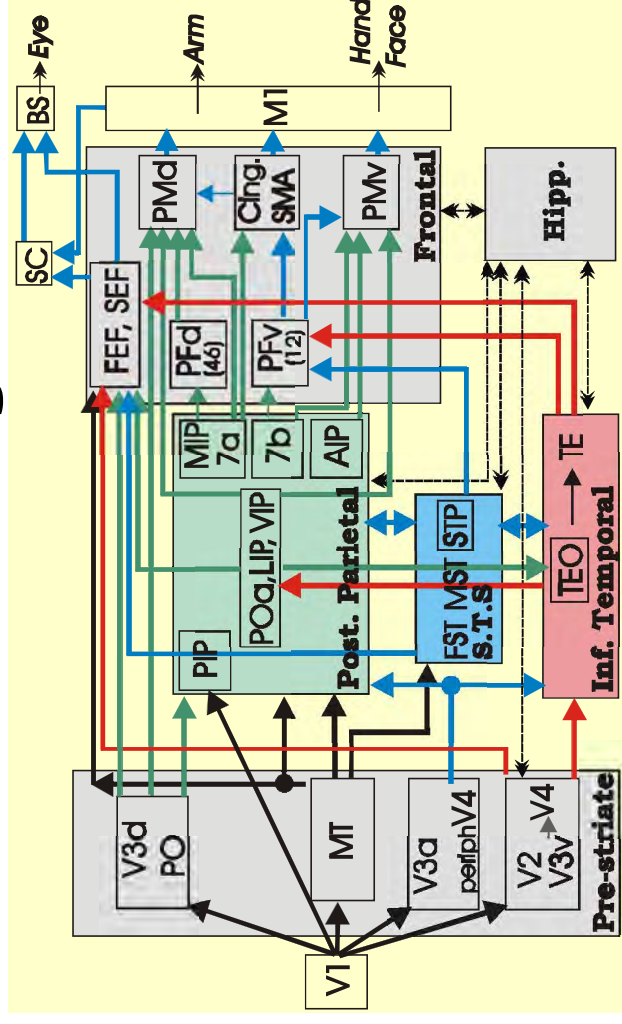
ou visuo-moteur automatique?

PERCEPTION

Contrôle moteur

N.B.: Cohérent avec la vision aveugle

Interaction et convergence : convergence vers le lobe frontal



Contrôle moteur

Contrôle de l'action

Inhibition de l'action

Contrôle de l'action

La lésion du cortex frontal abolit à la fois:

les capacités d'inhibition des **corrections** automatiques

et

les capacités d'inhibition de l'**initiation** du geste

Contrôle de l'action



Contrôle de l'action



Apprendre à inhiber...

... Acquérir de nouvelles stratégies



Le lobe frontal

Contrôle de l'action



Eduardo Leite (2012)

« vous allez avoir du travail! »

Le très célèbre cas décrit par David Ferrier: Phineas Gage (1879):
Un contre-maître modèle qui survécut pendant 12 ans!
Mais l'inventaire de ses problèmes commence après les soins.....

« un enfant pour l'intelligence et les manifestations intellectuelles,
un homme pour les passions et les instincts »

Slate.fr/story/90151/phineas-gage-patient-neurosciences

Le lobe frontal

Ex: patient de Brickner: ablation frontale bilatérale

Examen neurologique: RAS ! (parler, entendre, agir, comprendre, discuter)
+ expert en échecs, conscient de son opération, etc

MAIS:

De timide et modeste, il se met à se vanter ses prouesses professionnelles, physiques, sexuelles.
plus de réserve, pas d'adaptation aux interlocuteurs
perte de **planification**: avenir, créativité, initiative...

(→ **moria** du syndrome frontal)

Syndrome frontal

Action

Négligence Motrice
Apraxies

Visuo-spatial / constructif

Oculomotricité
Négligence spatiale
Apraxie constructive

Langage

Aphasie, aprosodie

Mémoires

Accès à la mémoire (travail / long terme)

Fonctions exécutives

Syndrome dysexécutif cognitif

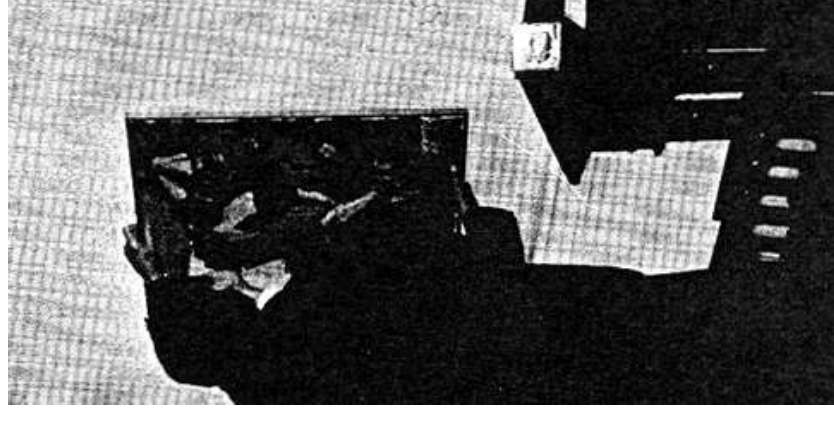
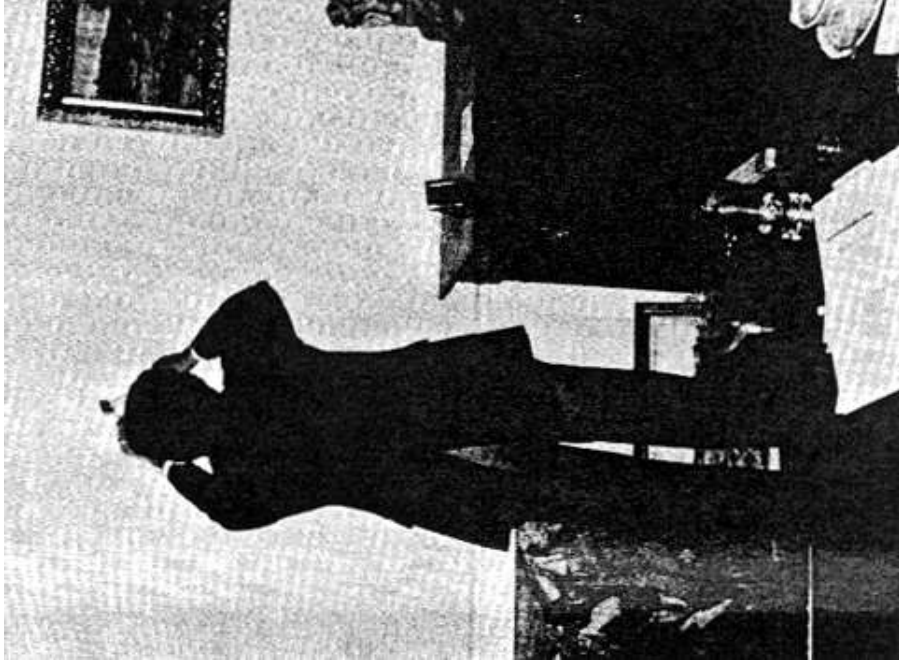
Comportement

Syndrome dysexécutif comportemental

Contrôle de l'action

La dépendance à l'environnement: comportement d'utilisation

Contrôle de l'action



Lhermitte 1986

L'imitation



Contrôle de l'action

Lhermitte 1986

La dépendance à l'environnement

Contrôle de l'action

C'est le stimulus qui contrôle le sujet!

(et non l'inverse)

La médiation frontale

- Inhibition des réponses par défaut
- Sélection des réponses (y compris par défaut)
- Élaboration de nouvelles réponses

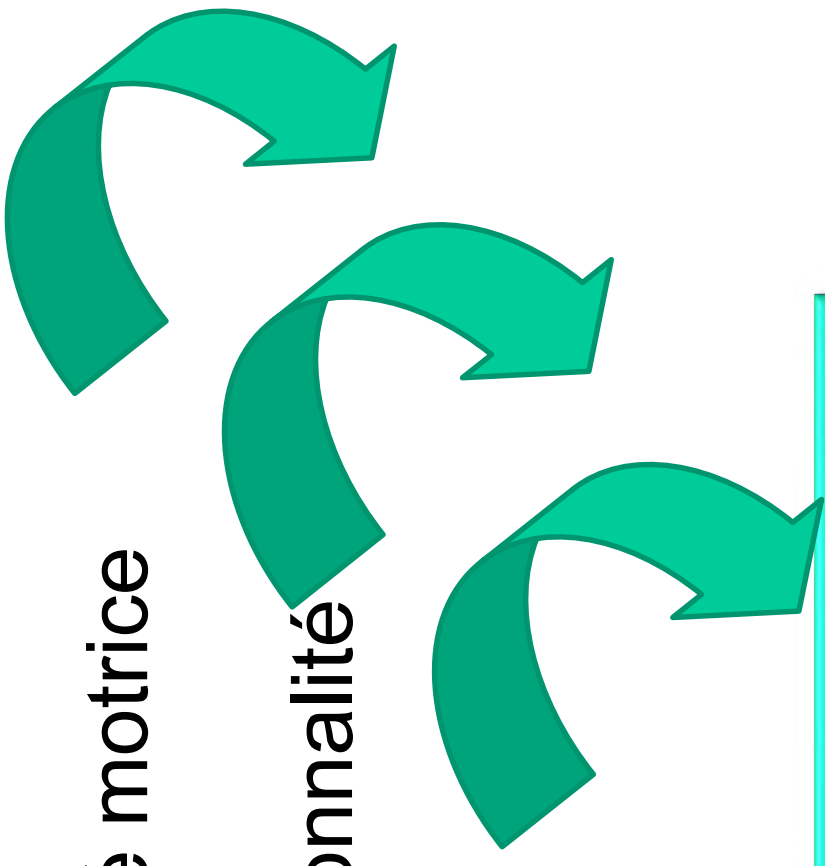
Le lobe frontal

⇒ Troubles de l'activité motrice

⇒ Troubles de la personnalité

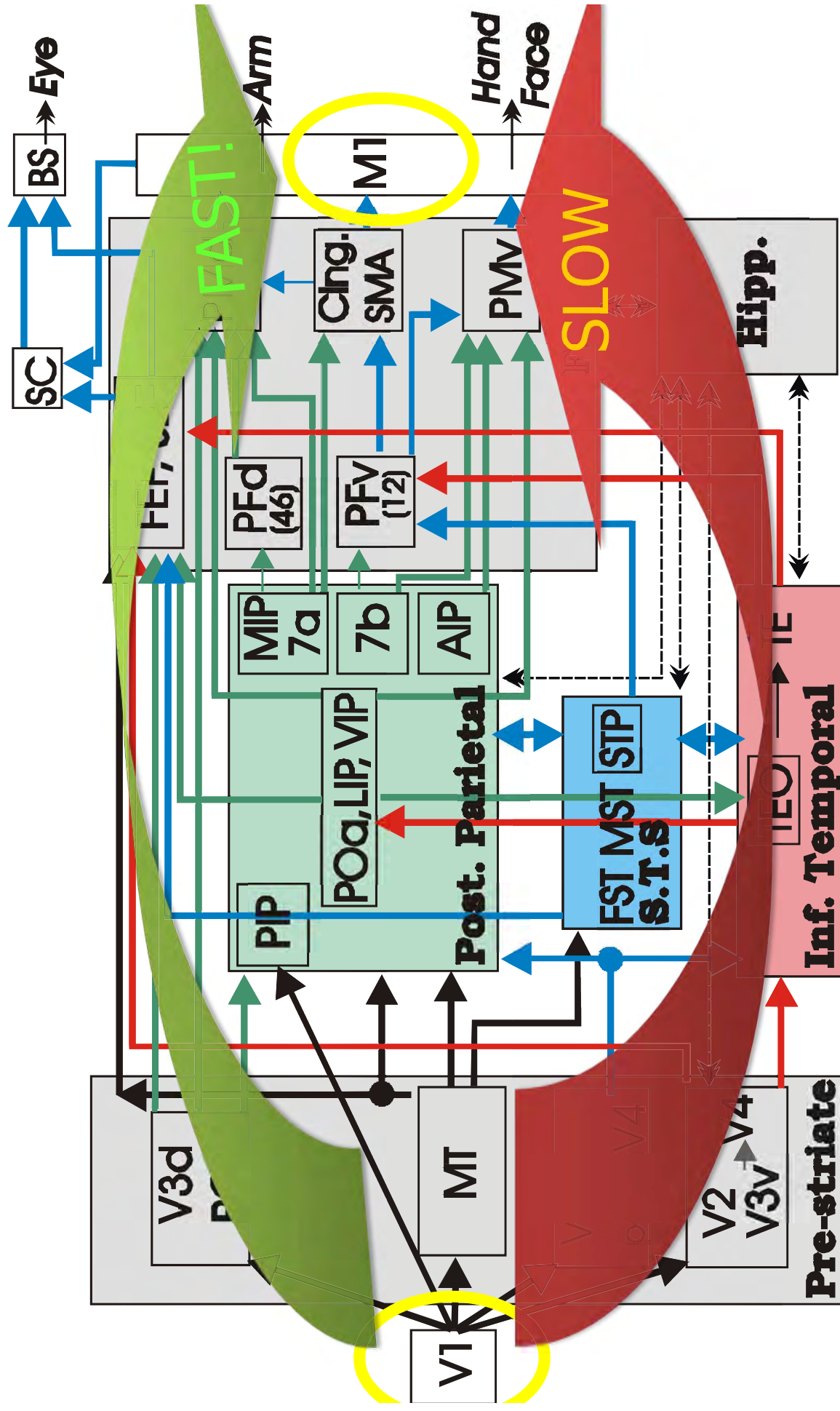
⇒ Troubles cognitifs

manifestations
Comportementales



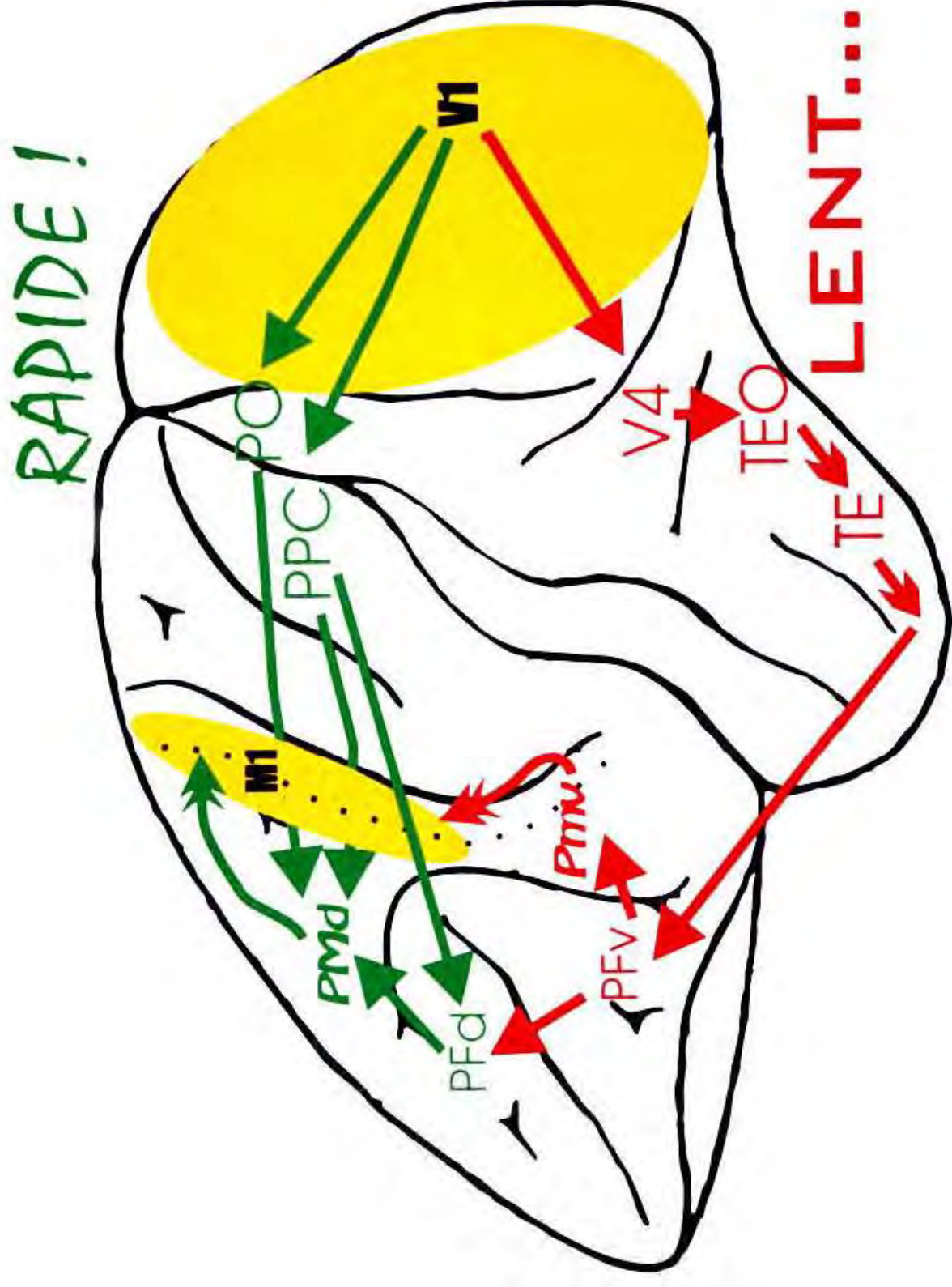
Contrôle de l'action

De l'entrée visuelle à la sortie motrice



deux grands systèmes visuo-moteurs

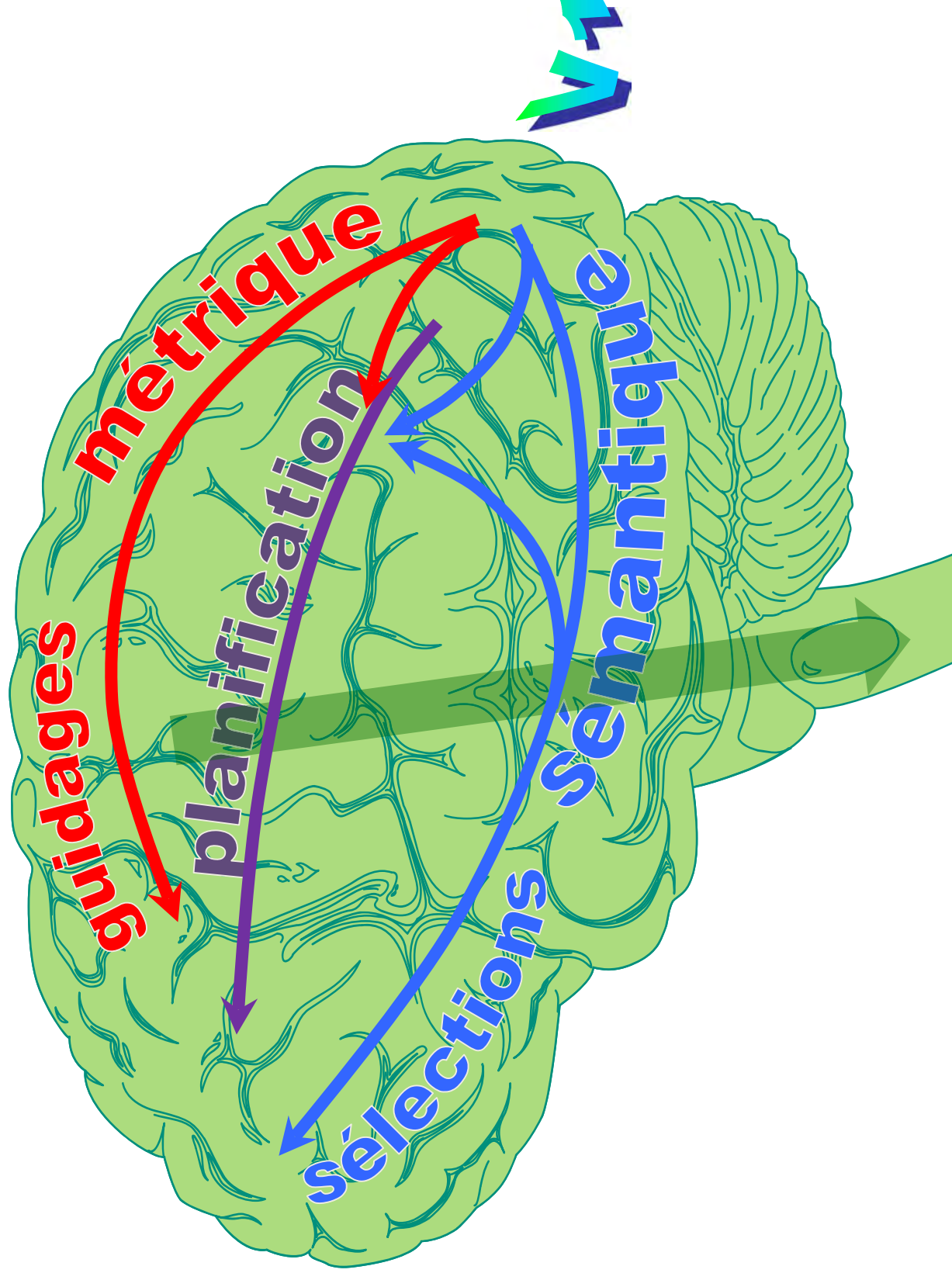
Contrôle de l'action



Contrôle de l'action



Deux voies corticales chez l'homme ?

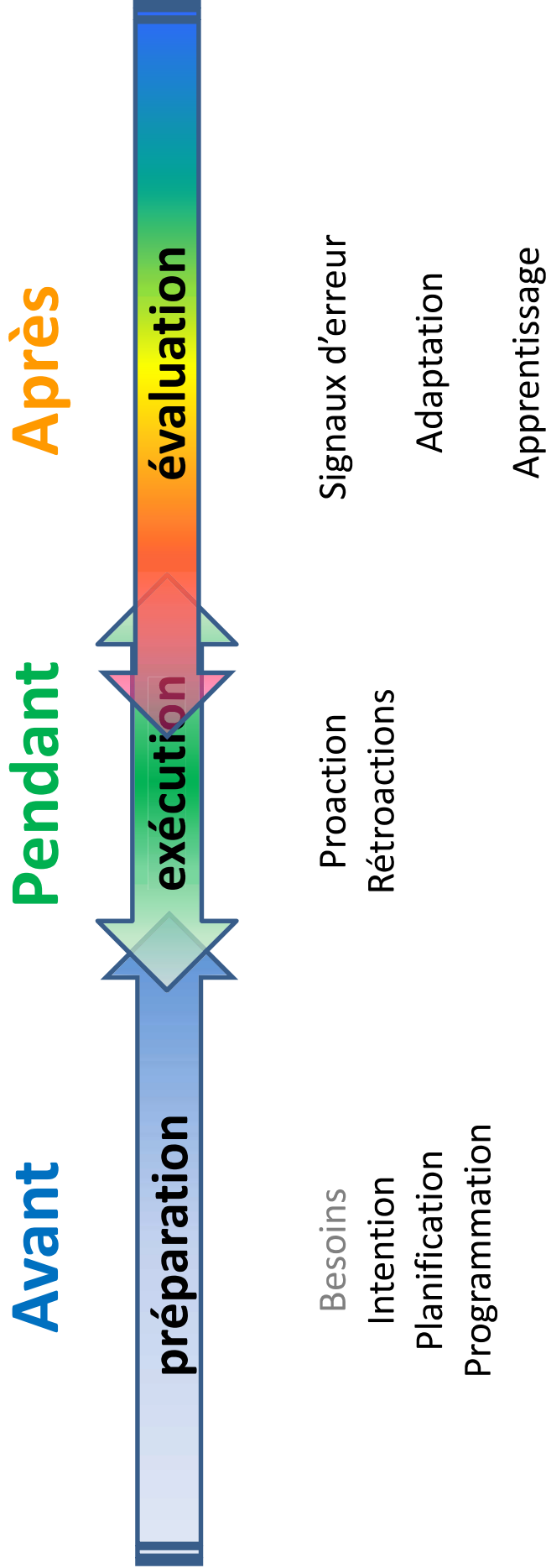


Contrôle de l'action

Plasticité de l'action

et après l'action...

Plasticité de l'action



Après l'action...

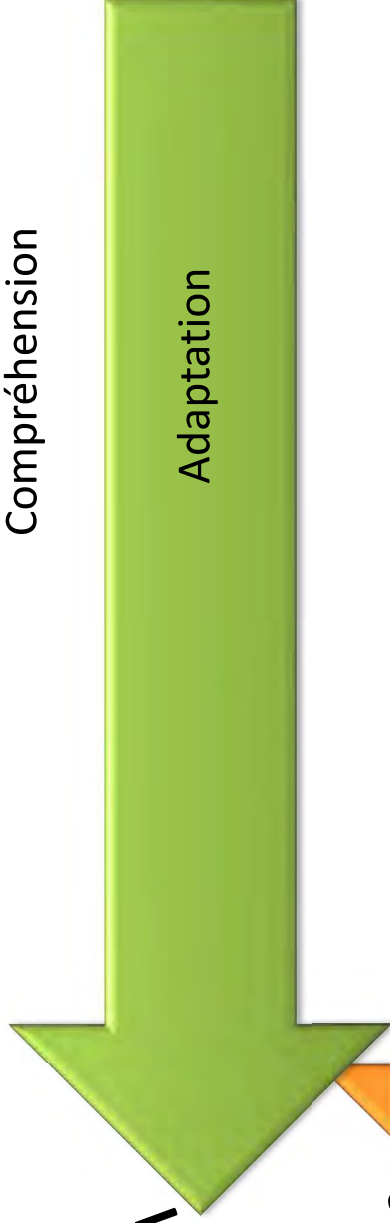
Plasticité de l'action

Après



Signaux d'erreur

Analyse
Compréhension



Mise à jour du
modèle corporel



Mise à jour du
modèle du monde

Réagir aux erreurs motrices

Plasticité de l'action

Lorsque le SNC détecte une erreur à la fin d'un mouvement, quelle est la meilleure réaction?

Le cerveau peut l'ignorer et attendre de voir ce qui se passe au prochain mouvement (*conservatif*)

Le cerveau peut décider d'utiliser cette erreur pour modifier la programmation du mouvement suivant (*contrôle proactif du mouvement suivant*)

Le cerveau peut analyser la cause de l'erreur et modifier en conséquence les mouvements réalisés ensuite dans le même contexte (*apprentissage*)

En tout état de cause, le cerveau ne doit pas initier d'*adaptation* avant de vérifier si l'interface-sensori-motrice a été modifiée de façon **durable**

Plasticité de l'action

Dispersion

(bruit aléatoire)

Mais la moyenne est parfaitement juste



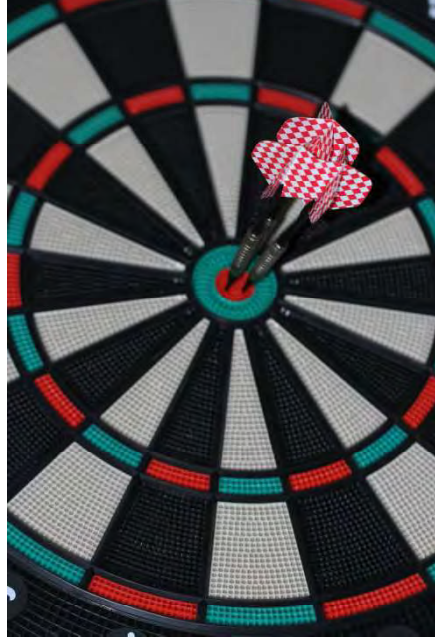
> Nécessite apprentissage

Biais systématique
(erreur de localisation)



> Nécessite adaptation

Précision



Distinction

Plasticité de l'action

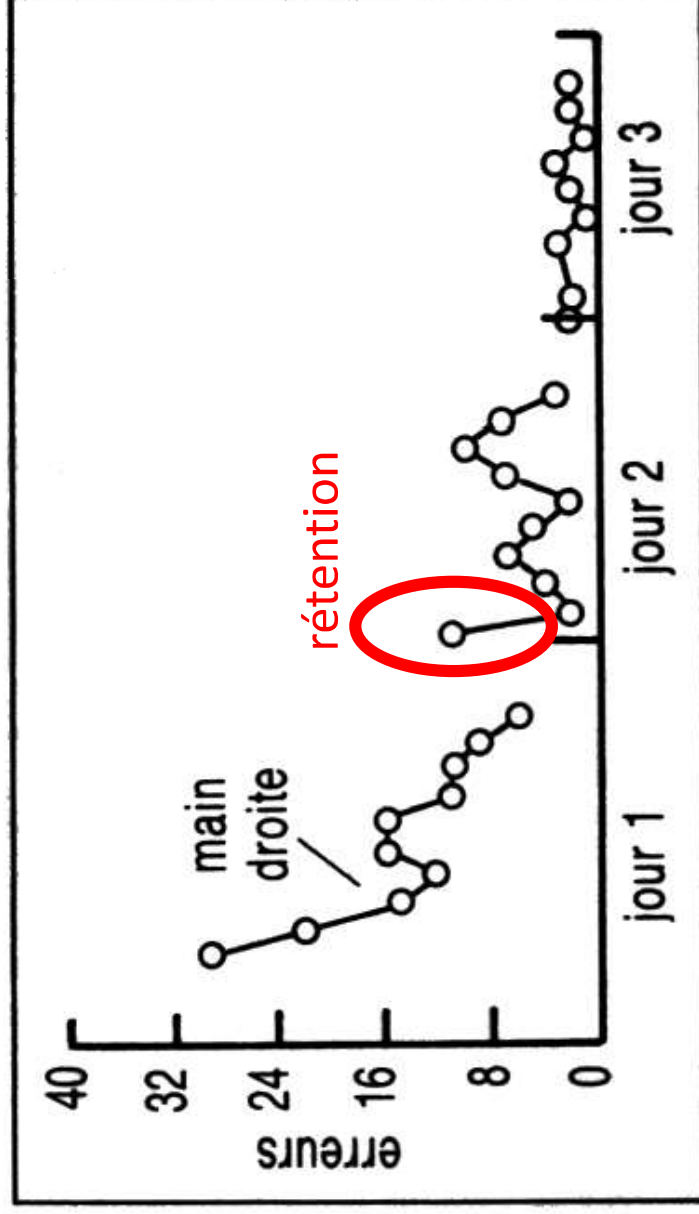
Apprentissage: mise en place d'une nouvelle aptitude sensorielle cognitive ou motrice.
Acquisition d'un nouveau comportement pour usage ultérieur (savoir-faire)

Adaptation: Modification d'une fonction existante permettant de compenser une modification durable de l'environnement.
Modification durable d'un comportement existant pour l'adapter à une situation nouvelle

Apprentissage sensori-moteur

noisiV

Proprioception



Pas de probabilité!

Apprentissages: Les automatismes complexes

Automatisation et circuits sous-cortico - corticaux

Exemples cliniques du **syndrome frontal**:

Grasp reflex
Comportement d'utilisation
La dépendance à l'environnement

+ Libération des automatismes

Automatisation

Transfert des commandes des réseaux corticaux vers des réseaux sous-corticaux:

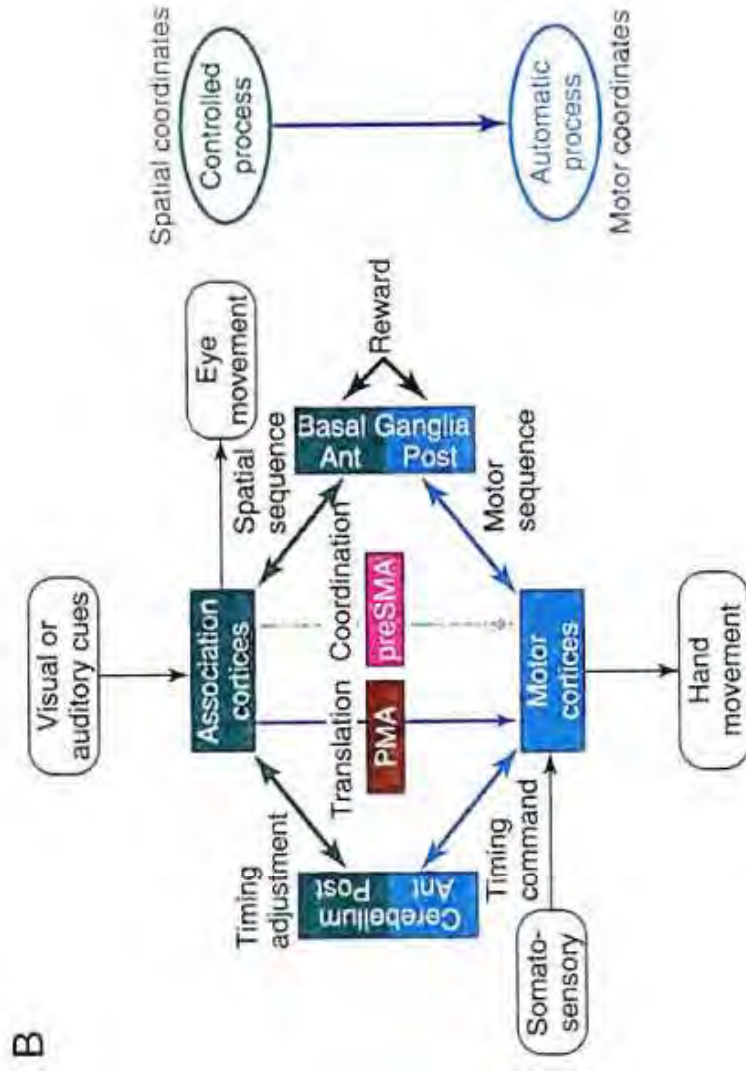
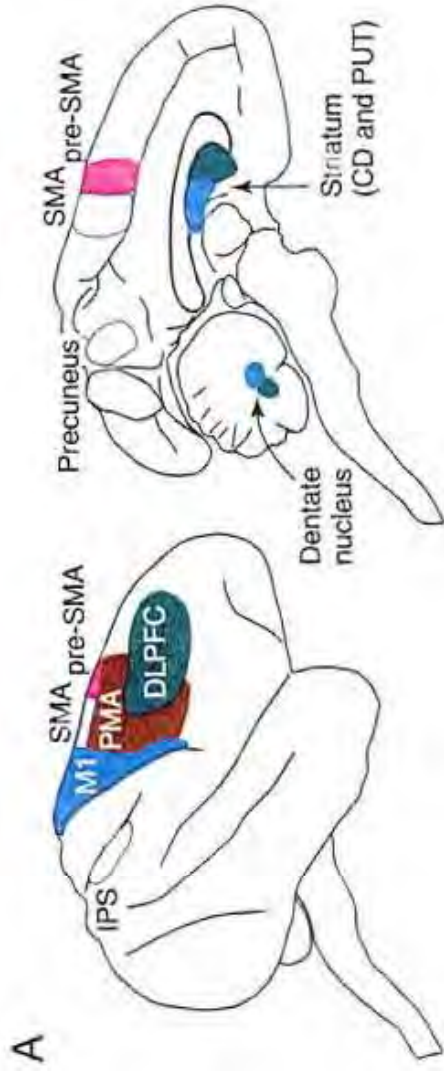
Le mouvement est contrôlé par les noyaux gris et le cervelet,

et les réseaux corticaux assurent sa supervision

Apprentissage et automatisation

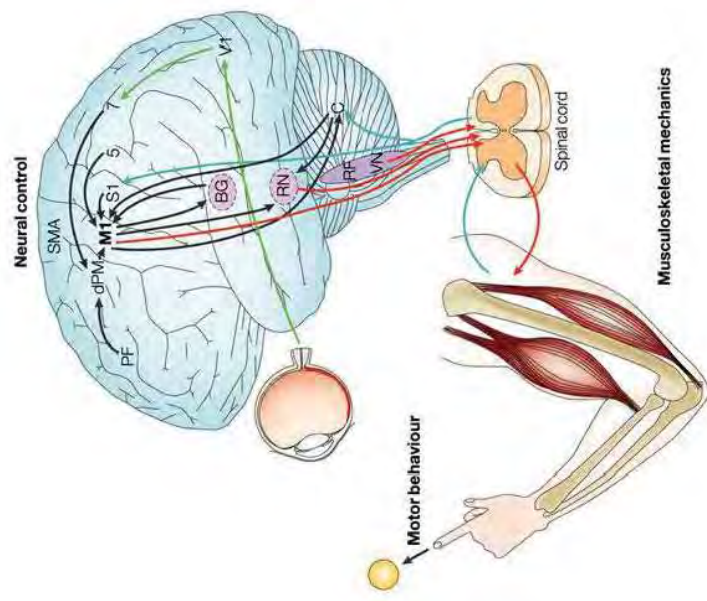
Etudes chez les primates des réseaux impliqués dans l'automatisation

Plasticité de l'action



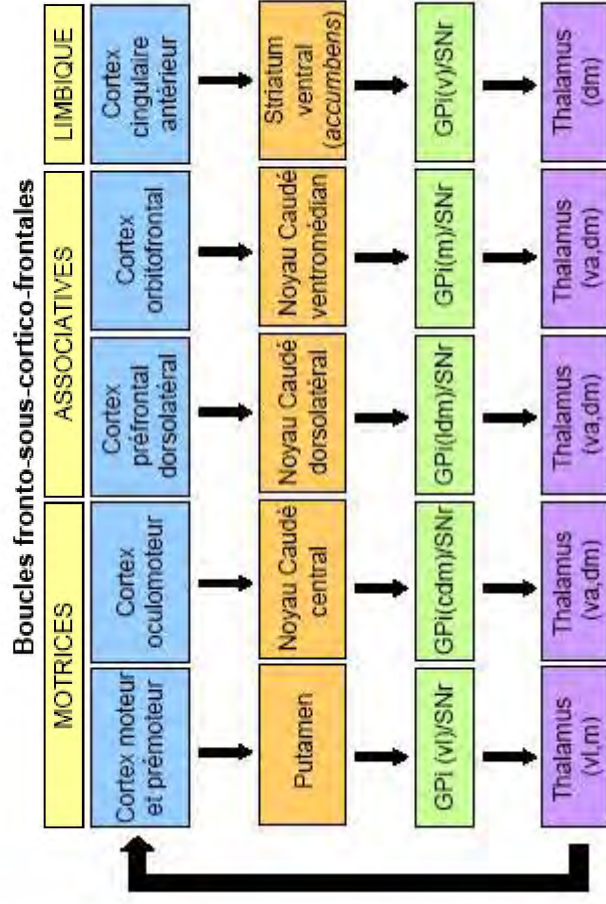
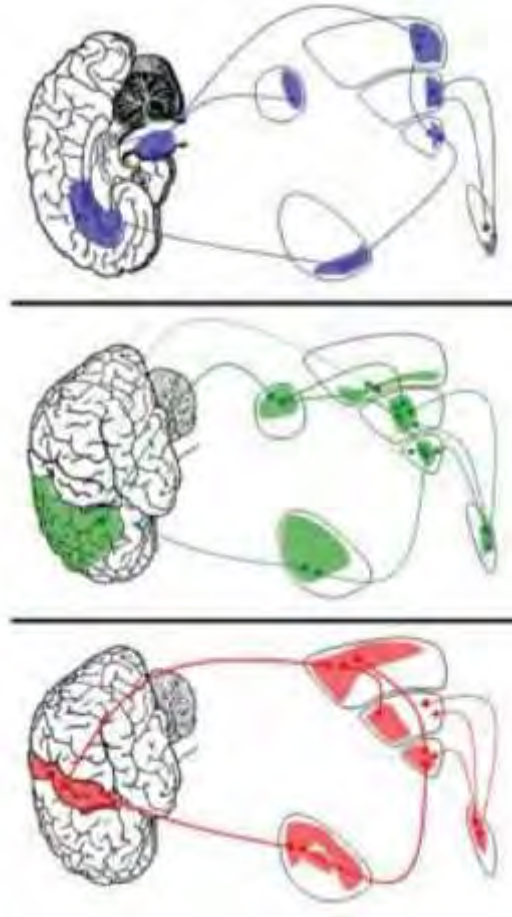
Apprentissage et automatisatisation

Il existe non seulement des parallélismes corticaux, mais de nombreuses boucles cortico – sous cortico - corticales



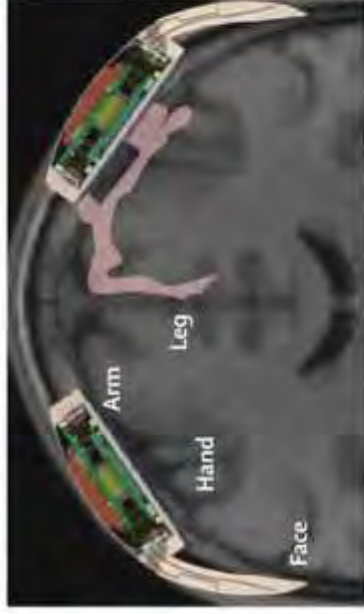
Nature Reviews | Neuroscience

Plasticité de l'action



Apprentissage et automatisisation : prise en compte dans les stratégies de restauration de la motricité

B WIMAGINE wireless recorder



Interfaces cerveauux-machines :
« **Contrôle** » **d'un exosquelette**
avec un **implant électro-**
corticographique
> Nécessité de déléguer à
l'exosquelette l'automatisme de
la marche

C EMY exoskeleton



Adaptation prismatique

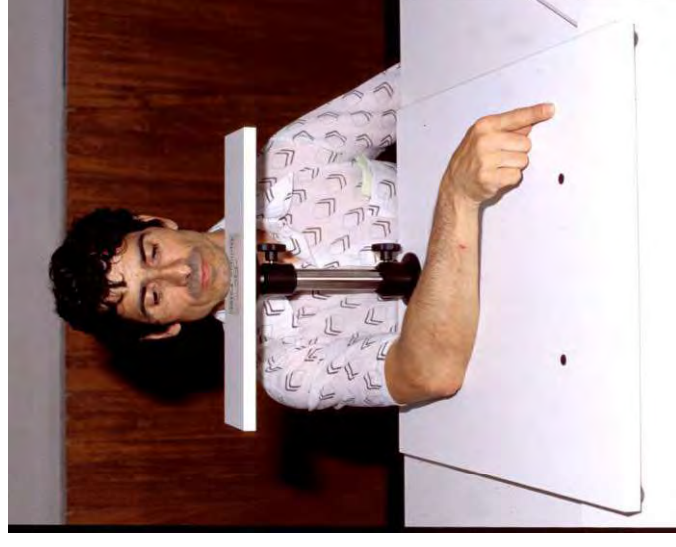
Plasticité de l'action



Pre-test

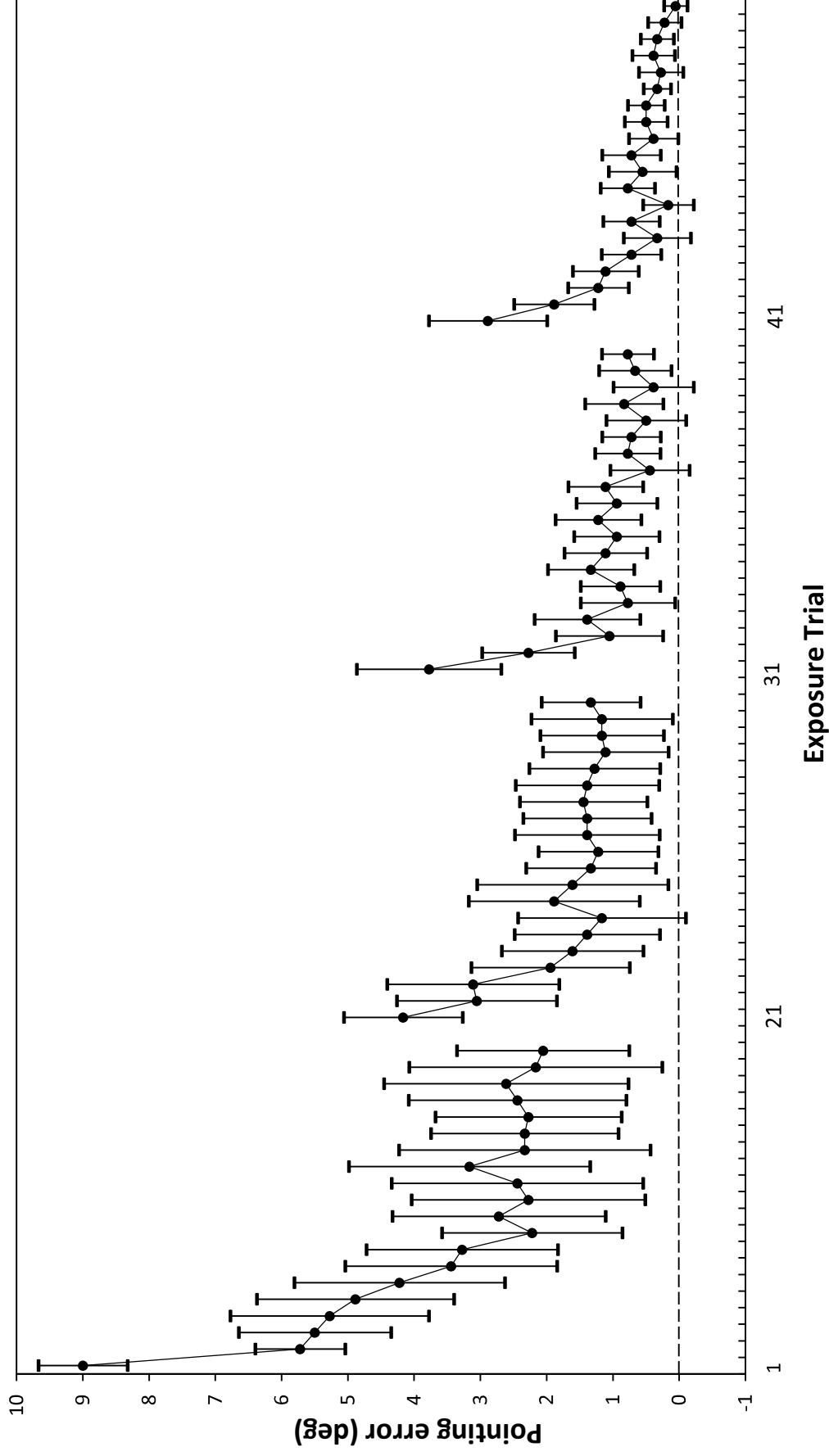


Active Exposure



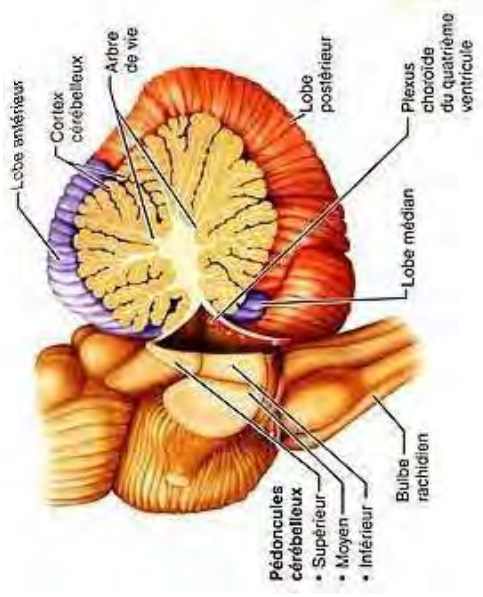
Post-test

Des erreurs initiales compensées progressivement

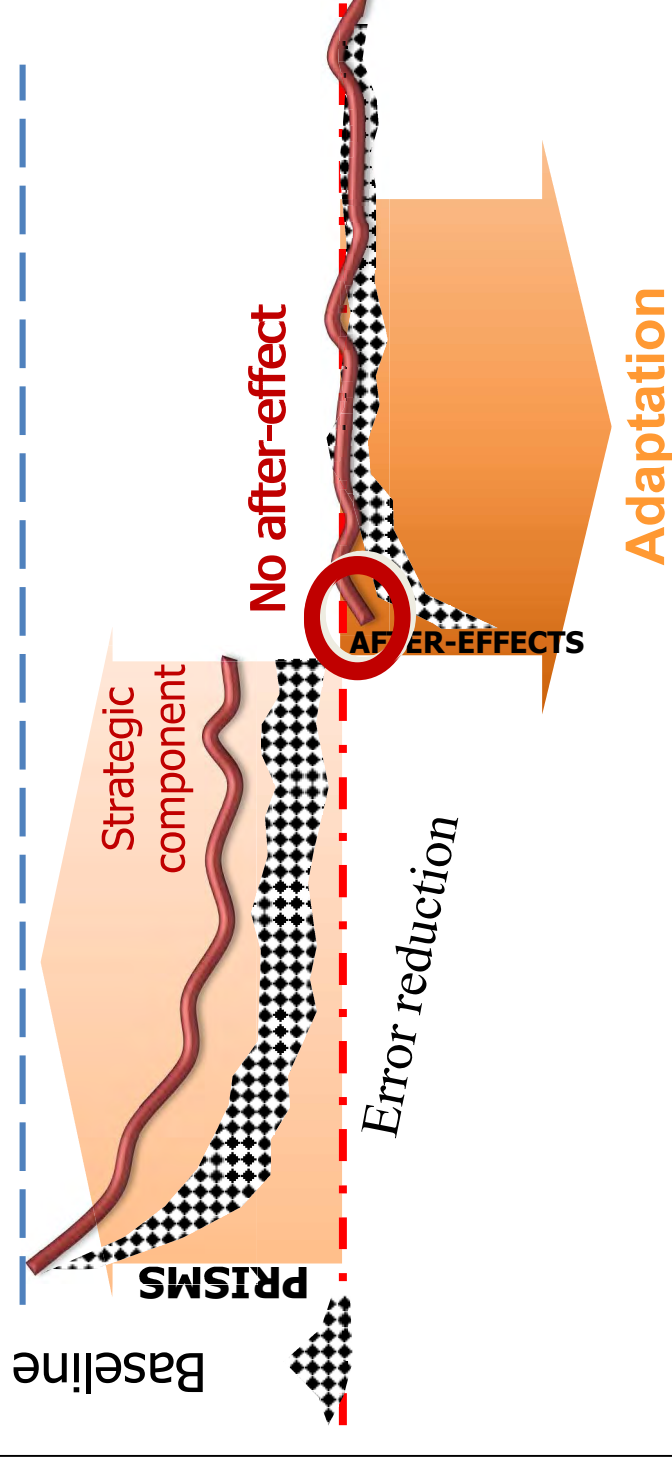


Effets consécutifs de l'adaptation

Plasticité de l'action



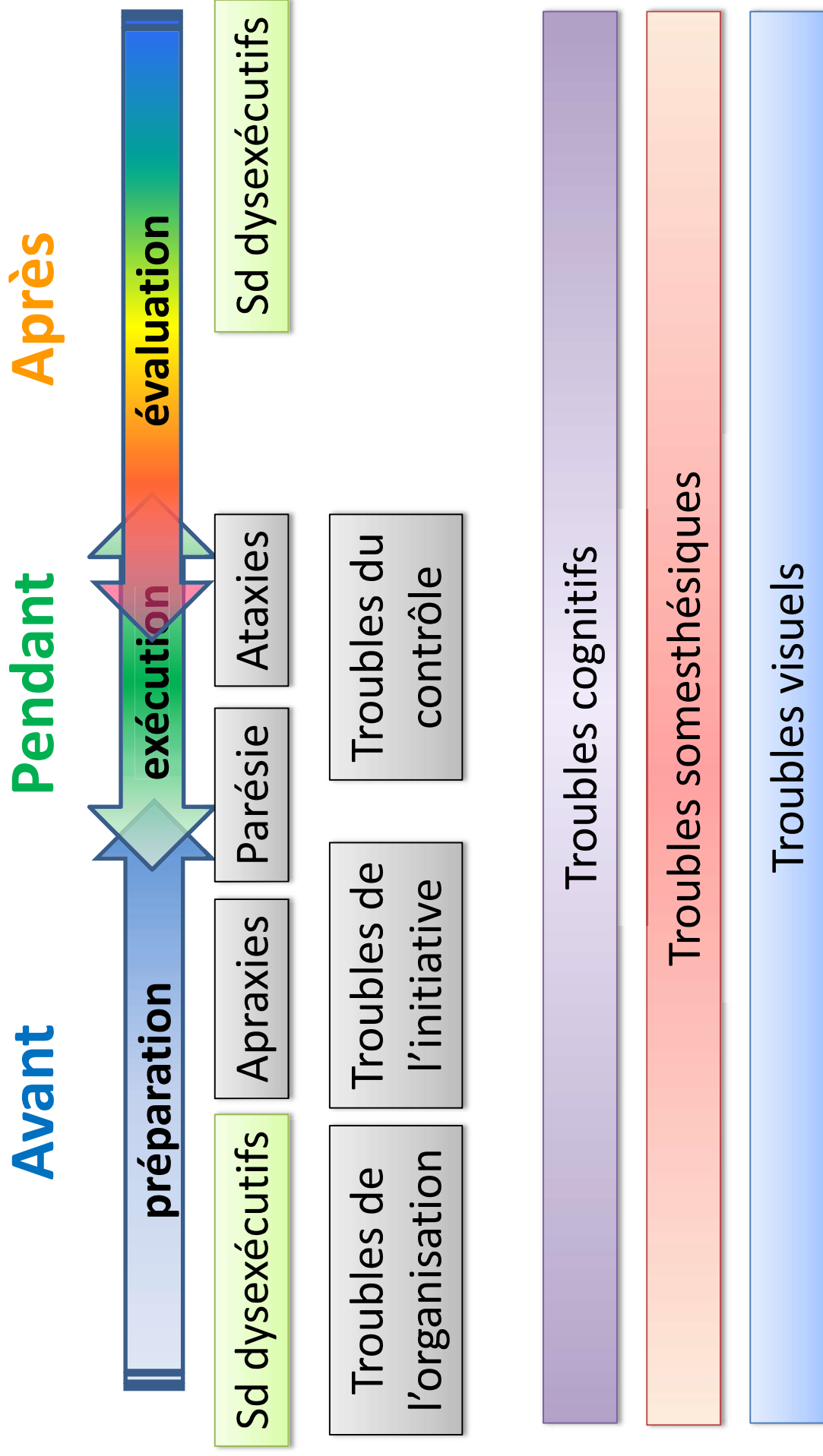
Prism exposure De-exposure



L'action perturbée

Synthèse

L'action perturbée

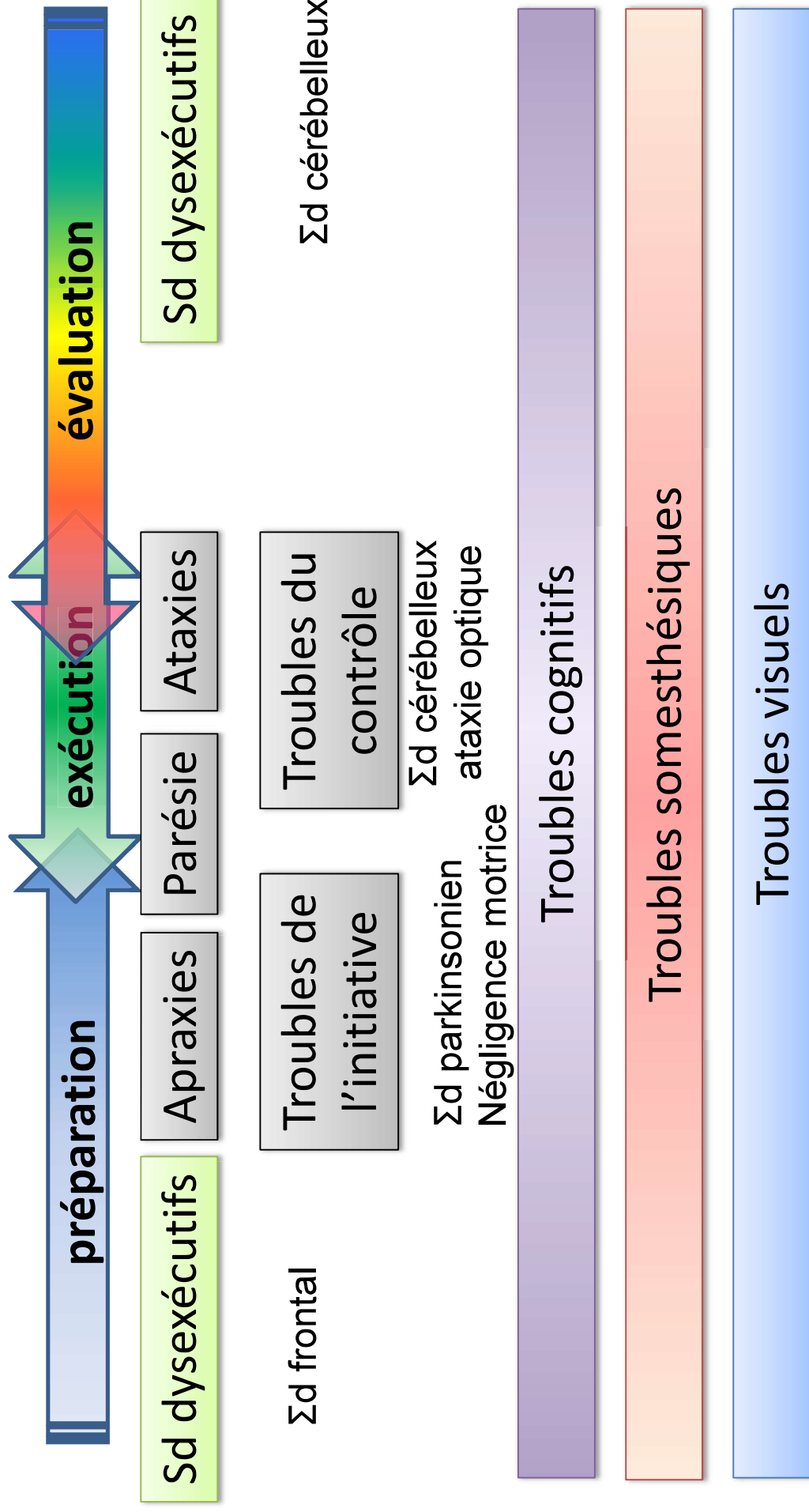


L'action perturbée

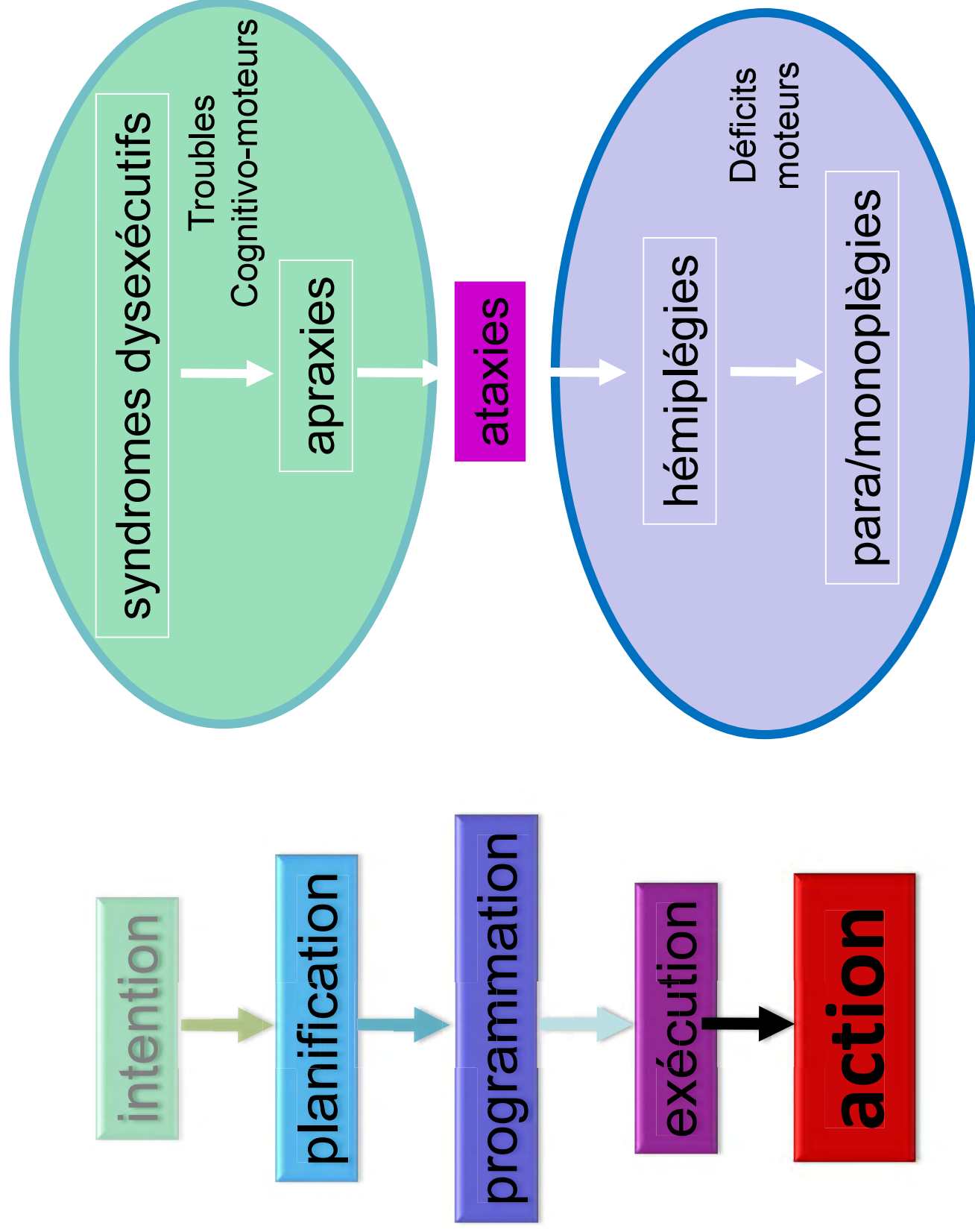
Avant

Pendant

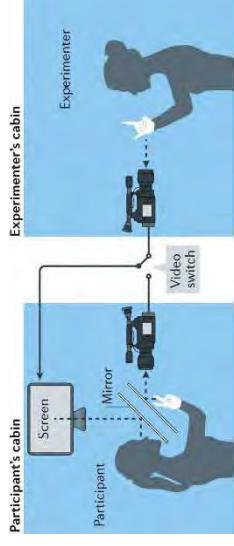
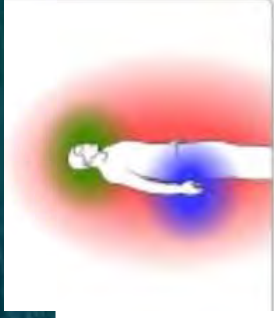
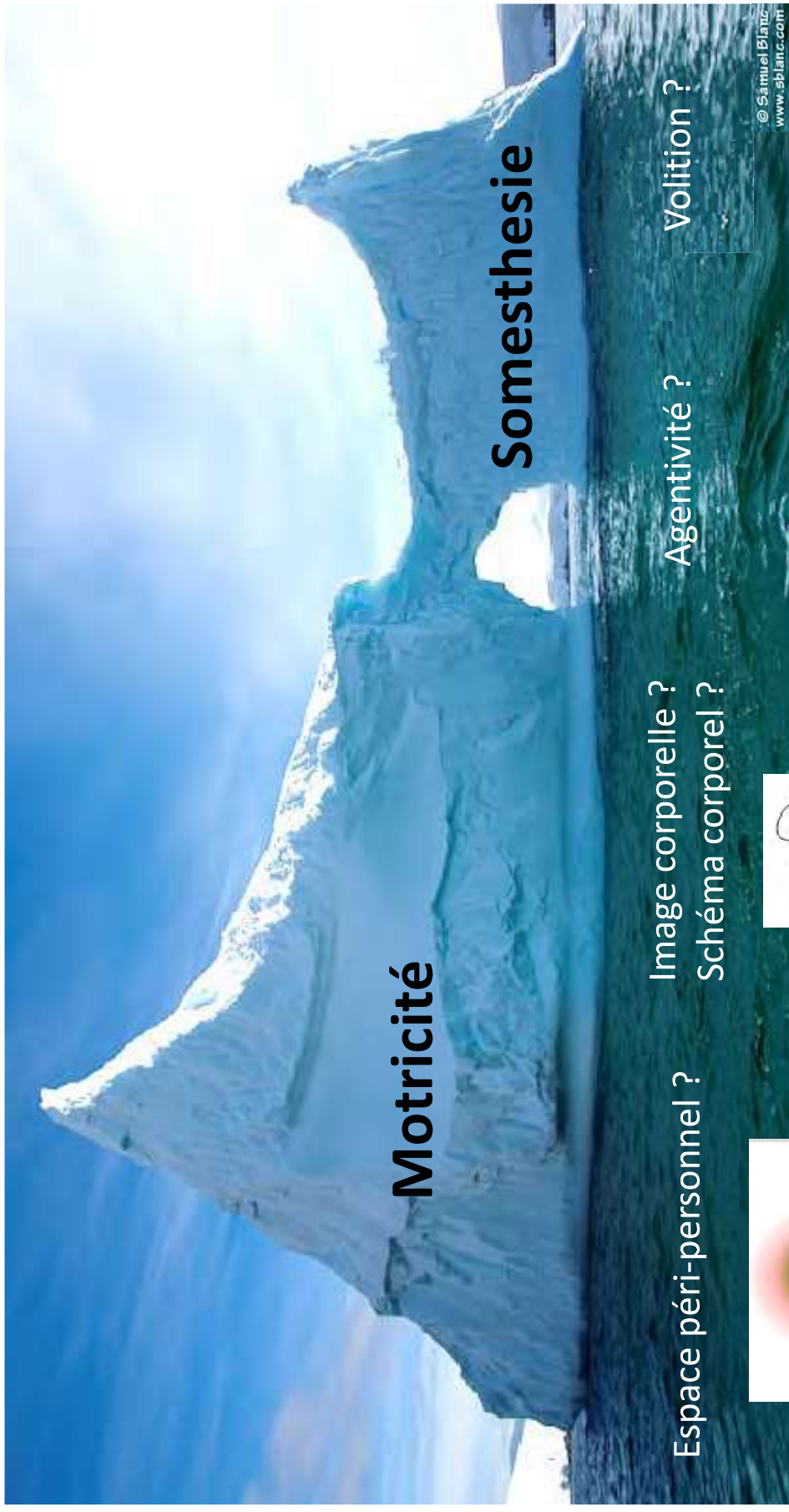
Après



Les niveaux hiérarchiques de l'action



Au-delà de la partie visible du handicap moteur ?



Trends in Cognitive Sciences

Nature Reviews | Neuroscience

Nuara, 2019

Haggard, 2017



Take home message

- La réalisation d'un geste volontaire nécessite le bon fonctionnement de nombreuses régions du système nerveux central et périphérique, bien au delà des zones dites du « système moteur » (en + du bon fonctionnement des effecteurs et des organes sensoriels)
- Il reste beaucoup à faire pour comprendre l'action volontaire, et la restaurer en cas d'atteinte.

Quelques lectures

Godeau et Chéron : Le mouvement (ed MEDSI)

Jeannerod (1983) Le cerveau machine: physiologie de la volonté. Fayard

Archibald SJ, Mateer CA, Kerns KA. Utilization behavior: clinical manifestations and neurological mechanisms. Neuropsychol Rev. 2001, 11(3):117-30. (Review)

Cambier J. La perte d'autonomie de l'homme: comportements d'utilisation et d'imitation. Rev Neurol (Paris). 1999 Oct;155(10):879-83. (revue)

Lhermitte F, Pillon B, Serdaru M. Human autonomy and the frontal lobes. Part I: Imitation and utilization behavior: a neuropsychological study of 75 patients. Neurol. 1986;19(4):326-34.

Lhermitte F. 'Utilization behaviour' and its relation to lesions of the frontal lobes. Brain. 1983;106 (P2):237-55.

Rossetti Y and Rode G (2004) De la motricité à l'action. In: L'Apraxie (Le Gall D and Aubin G, eds.), Solal: Marseille, p. 15–44. (pdf sur www.u864.lyon.inserm.fr/publications)

Rode G, Rossetti Y, and Boisson D (1997) Role de la vision dans la structuration du geste. Motricité Cérébrale 18:41-52. (pdf sur www.u864.lyon.inserm.fr/publications)

Rossetti Y and Pisella L (2000) L'ego Lego: deconstruire ou reconstruire le cerveau-esprit? Intellectica 2(31):137. (pdf sur www.u864.lyon.inserm.fr/publications)

Pisella L and Rossetti Y (2002) Neuropsychologie des relations perception/action. In: Percevoir, s'orienter, agir dans l'espace: Approche pluridisciplinaire des relations perception-action (Coello Y and Honore H, eds.), p. 205–235. pdf: <http://u864.lyon.inserm.fr/Publications/PisellaPercevoir2002>

Rossetti Y and Pisella L (2003) Mediate response as direct evidence for intention: Neuropsychology of Not to- now- and Not there- tasks. In: Cognitive Neuroscience perspectives on the problem of intentional action (Johnson SH, ed.), MIT Press, p. 67–107. (pdf sur www.u864.lyon.inserm.fr/publications)

Rossetti Y and Pisella L (2001) Une vision à deux vitesses Science & Vie septembre 2001(216):68. (pdf sur www.u864.lyon.inserm.fr/publications)