NEURONES MIROIRS

Pr F. HERAUT NEUROPHYSIOLOGISTE

NEURONES MIROIRS

La découverte récente des « neurones miroirs » par le neurophysiologiste Giacomo Rizzolatti représente une avancée importante dans la connaissance du fonctionnement complexe du cerveau. Le système miroir est impliqué dans les fonctions motrices mais aussi dans l'apprentissage par imitation, dans la compréhension de l'intention, il interviendrait aussi dans l'apprentissage du langage voire dans l'empathie et l'émotion.

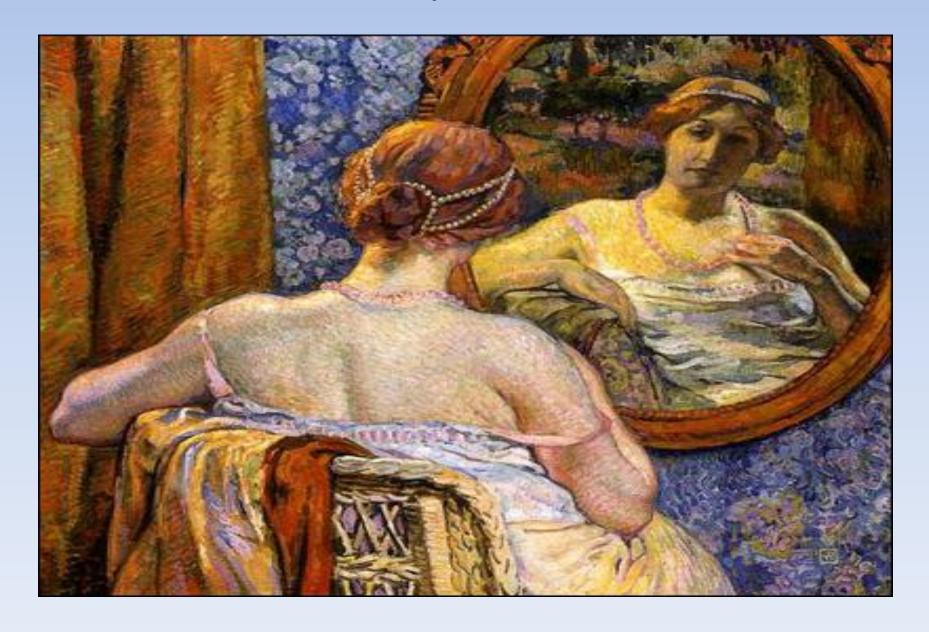
Que signifie «NEURONES MIROIRS »?

- L'activité de ces neurones est obtenue lorsque le sujet effectue un acte moteur vers un but et lorsqu'il observe, ou entend les autres effectuer le même acte moteur (réagit aux actions de soi et de l'autre).

 Le cerveau de l'observateur « reflète » directement l'action d'autrui par « coactivation » simultanée
- Leur sélectivité: chaque neurone ne répond qu'à un seul type d'action, mais ne répond pas à un autre geste:

un neurone activé par un mouvement de flexion des doigts ne réagira pas à l'extension.

Les « neurones miroir » font partie des neurones moteurs

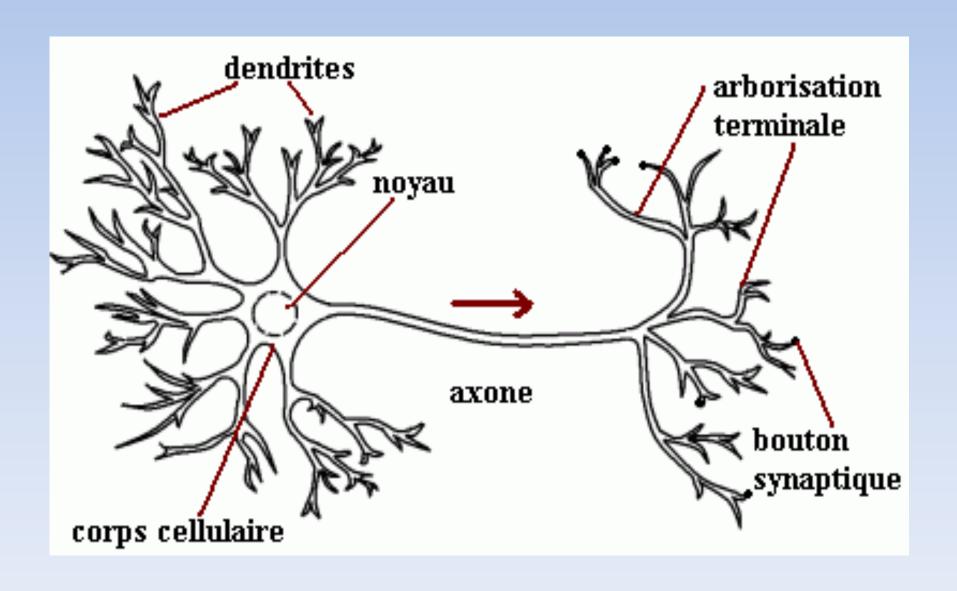


Le cerveau humain contient 80 Milliards de neurones

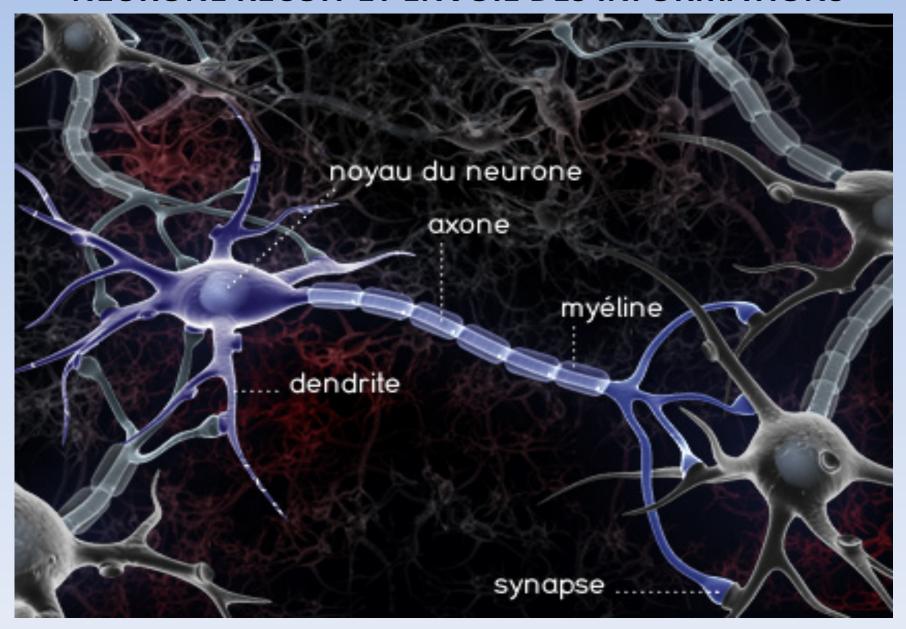
Les neurones: (cellule nerveuse)

- transmettent des signaux électriques intervenant dans toutes les fonctions du cerveau.
- sont entourés de environ 100 Milliards de cellules Gliales qui ont un rôle de support
- Les connexions entre neurones se font au niveau de milliards de synapses par des *neuromédiateurs* chimiques

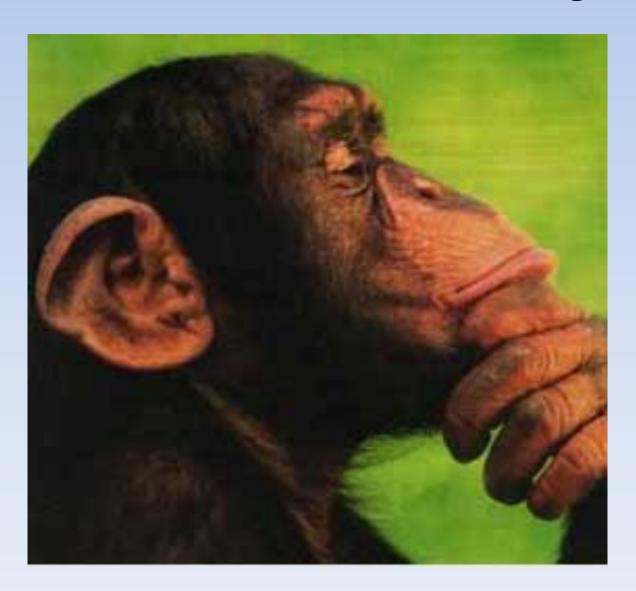
EXEMPLE DE NEURONE. PASSAGE DE INFORMATION



NEURONE RECOIT ET ENVOIE DES INFORMATIONS



1990 GIACOMO RIZZOLATTI découvre les neurones miroir chez le singe



GIACOMO RIZZOLATTI 1990 Directeur Neurosciences (Médecine. Parme)

Découvre par des enregistrements directs intracorticaux les « neurones miroirs » dans le cortex pré-moteur frontal (ventral) (Aire F5) du singe (macaque)

Distingue ces « neurones miroir » des autres neurones moteurs qu'on appelle «canoniques

>>

NEURONES CANONIQUES ET NEURONES MIROIRS

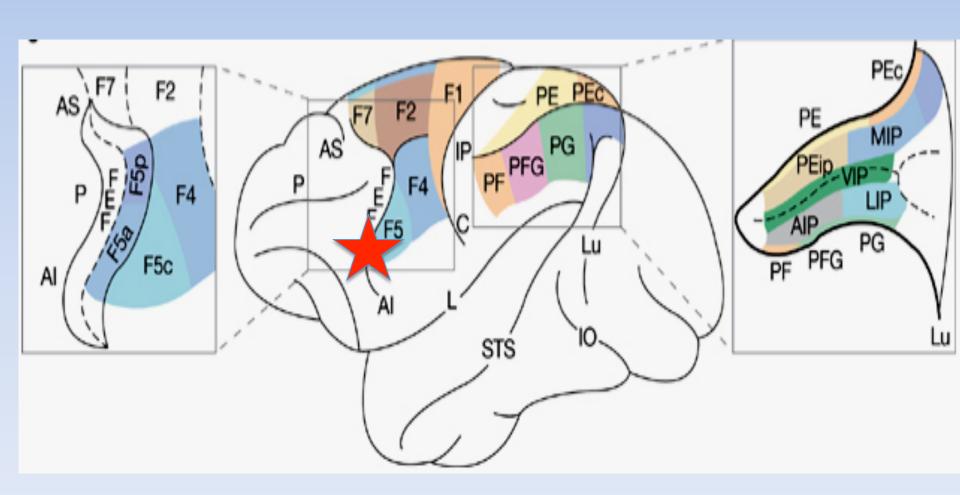
Les neurones « canoniques »

- s'activent lorsque l'animal exécute des actions sans but précis et lorsqu'il perçoit des objets préhensibles.

Les neurones « miroir »

- s'activent lorsque l'animal effectue un acte moteur
 vers un but précis mais aussi lorsqu'il observe, ou entend ses congénères effectuer le même acte moteur.
- **sont inactifs** lorsqu'il effectue des mouvements simples tels que déplacement d'une partie du corps sans but précis

CERVEAU DE SINGE. AIRE F5. CORTEX PREMOTEUR VENTRAL

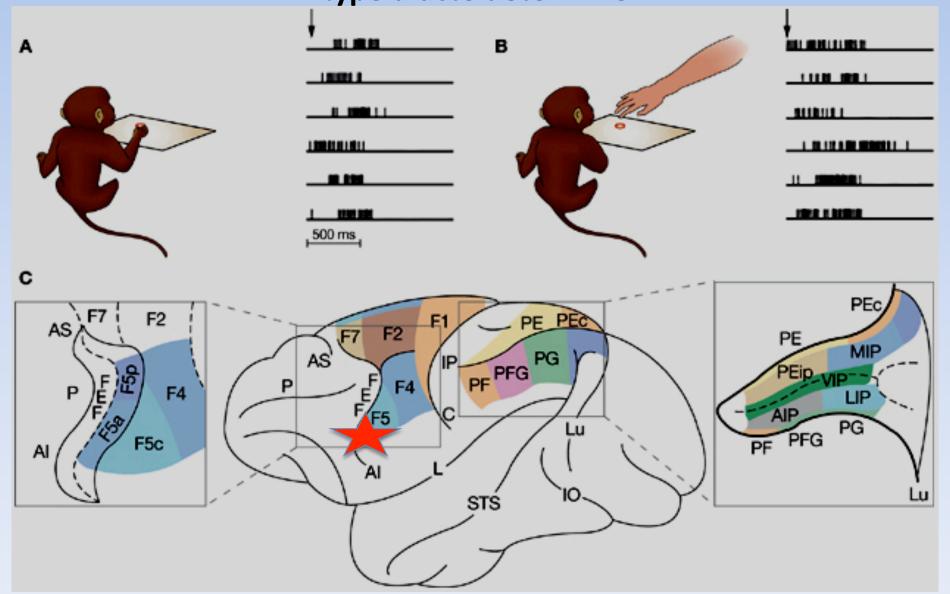


ACTIVATION NON SPECIFIQUE A UNE ESPECE ANIMALE (1996-2009)

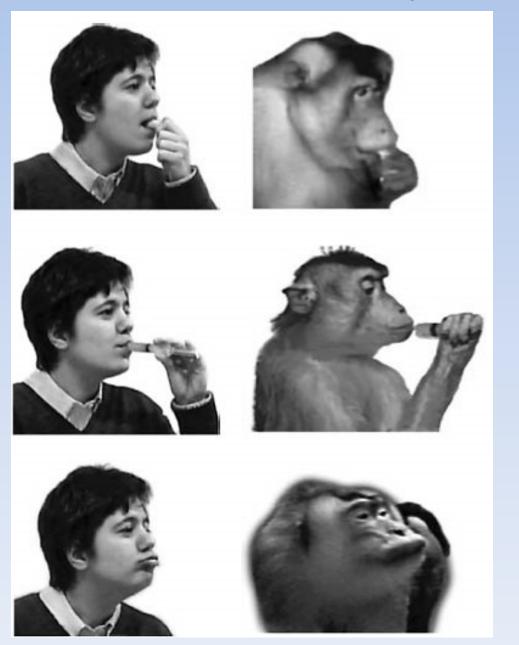
Le neurone miroir (Aire F5) <u>visuo-moteur</u> est activé de façon similaire quand le singe saisit un objet et quand il voit une main humaine saisir l'objet.

Activation de l'aire motrice F5 du singe par un geste humain <u>intentionnel</u>

A la vue de la main de l'expérimentateur, le singe comprend le type d'acte déterminé



Les neurones miroir sont activés par des actions oro-faciales diverses



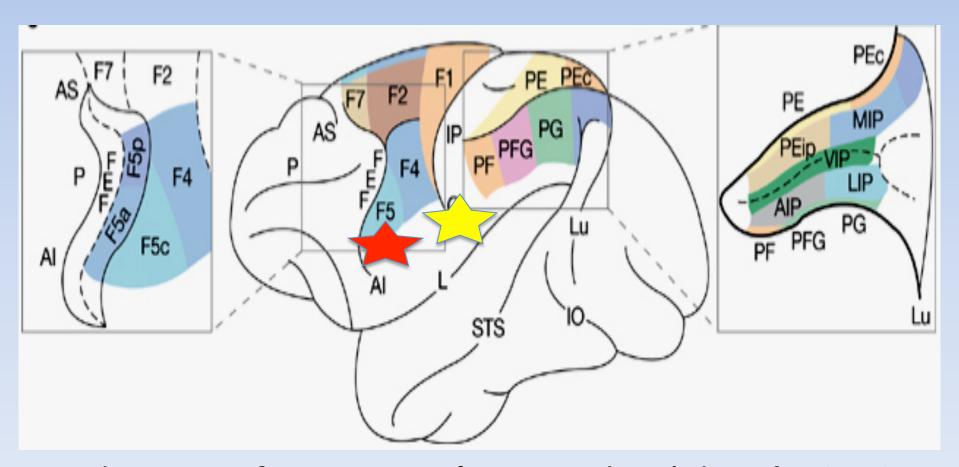
Saisie de nourriture

Aspiration de jus de fruit

Protrusion labiale



Des neurones miroirs identiques à ceux de l'aire F5 sont retrouvés dans *le lobe pariétal inférieur chez* le singe.



Ces deux aires forment un réseau impliqué dans *le circuit fronto-pariétal* qui organise l'action motrice lors d'un geste vers un but précis.

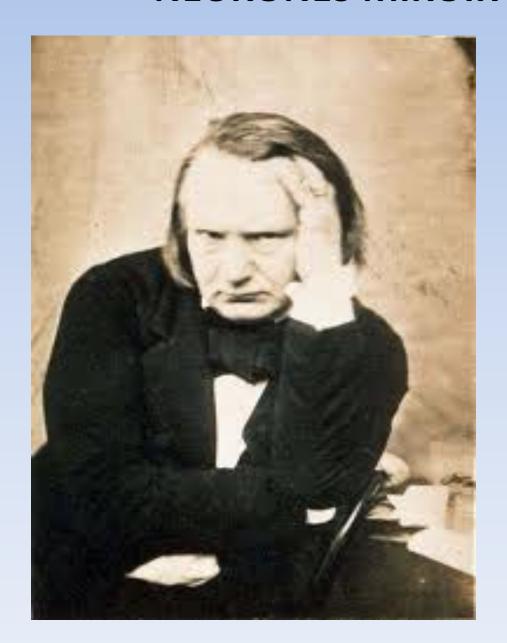
L' ACTIVATION DES NEURONES MIROIR N'EST PAS QUE VISUELLE

Les neurones miroir **sont actifs** lors **du mouvement intentionnel** que ce mouvement

- soit observé ou non observé
- soit entendu et non vu

L'information visuelle ou non visuelle envoie un message vers l'aire motrice F5 par des connexions spécifiques du sulcus temporal supérieur (STS).

NEURONES MIROIR CHEZ L'HOMME

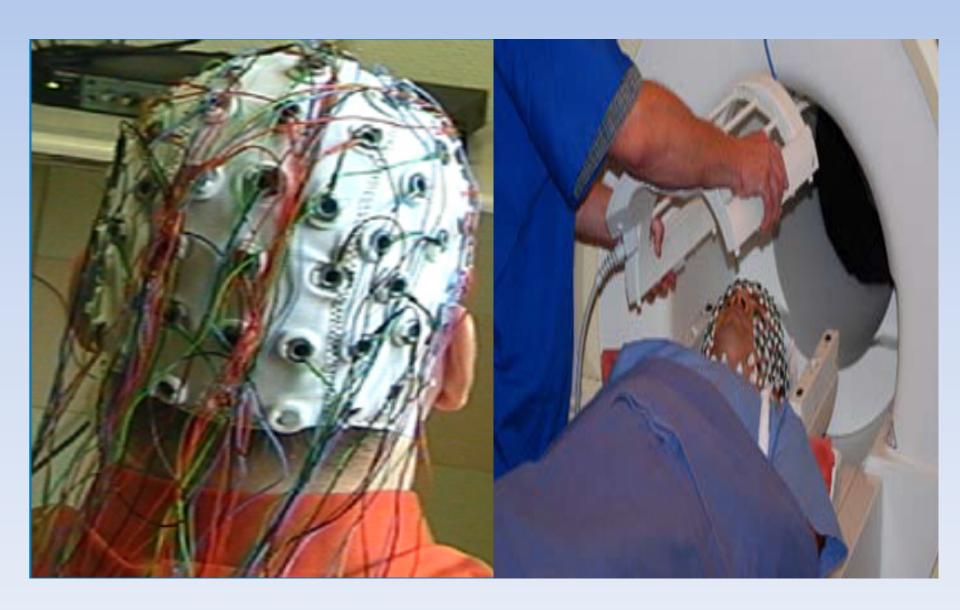


NEURONES MIROIRS CHEZ L'HUMAIN

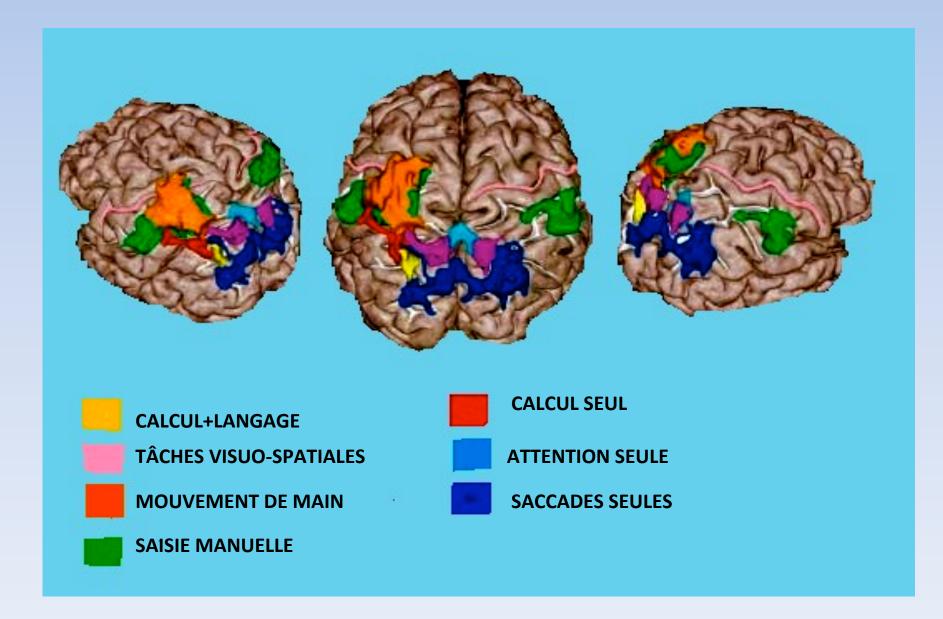
Chez l'être humain, pas de preuve scientifique directe de l'existence d'un système miroir (impossibilité éthique de placer des électrodes intracérébrales) cependant les preuves de l'existence des neurones miroirs chez l'Homme sont apportées par de multiples techniques.

en électroencéphalographie en imagerie: IRM fonctionnelle (2001 et.....): visualise les variations du flux sanguin des régions du cerveau lors d'actes moteurs

EEG et IRMf



IRMf: activation cérébrale lors de tâches diverses



DECOUVERTE DE DEUX RESEAUX PRINCIPAUX CHEZ L'HUMAIN

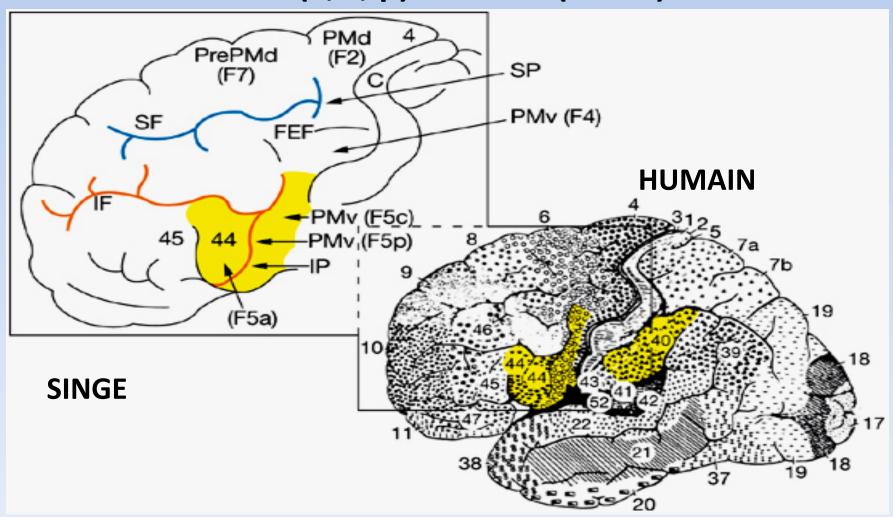
Premier réseau: système miroir « fronto-pariétal »

- dans le cortex pré-moteur (aire 44 de Broca)
- dans le lobe pariétal inférieur (aire 40 de Brodman)
 (réseau plus important que chez le singe)

Deuxième réseau: système miroir « limbique »

- insula et système limbique

Système miroir fronto-parietal Correspondance anatomique singe/humain AIRE F5 (a, c, p)=AIRE 44 (Broca)



NEURONES MIROIRS CHEZ L'HUMAIN

Chez l'Homme:

Les neurones miroirs sont actifs lorsque le sujet:

- Il effectue un acte moteur précis
- **Il observe** un autre sujet effectuer un acte similaire
- **Il entend** un autre sujet effectuer un acte similaire
- Mais aussi quand il pense que l'autre va effectuer cette même action

NEURONES MIROIR ET IMITATION

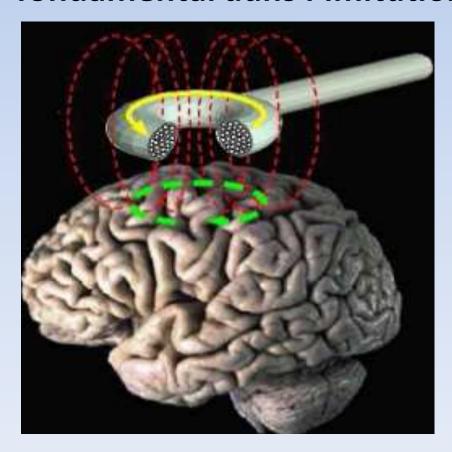
Le système miroir est activé aussi *lorsqu'un sujet imite* un geste effectué par un autre individu.

Les études de MEG (2003)
(champs magnétiques
Induits par l'activité
électrique des neurones)
montre la reproduction de
l'action motrice par le
système miroir.



NEURONES MIROIR ET IMITATION

Les expériences d'IRMf, de MEG et de stimulation magnétique transcrânienne (TMS) ont fourni des preuves que le système « miroir » humain joue un rôle fondamental dans l'imitation.





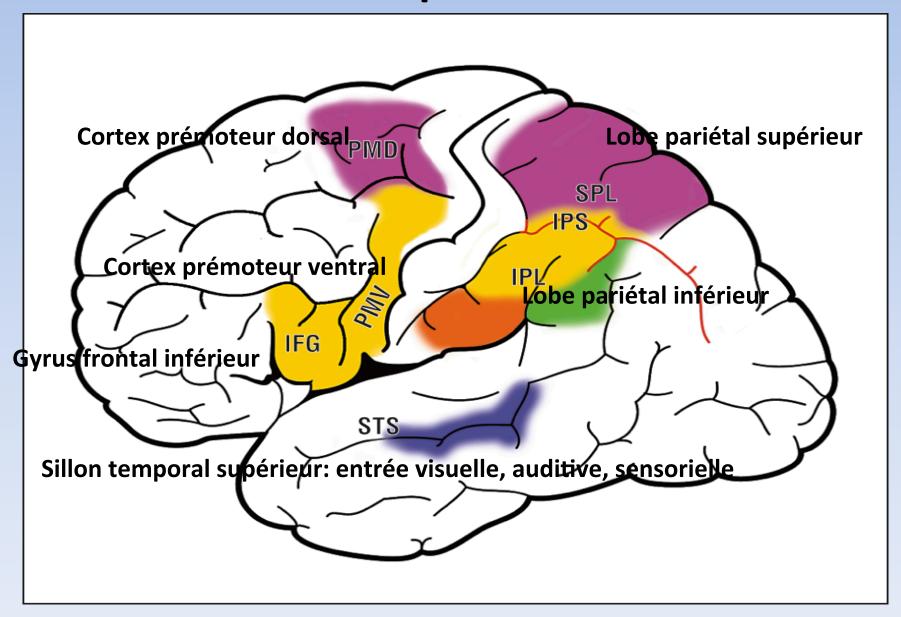
STIMULATION MAGNETIQUE TMS

RESEAU FRONTO-PARIETAL HUMAIN

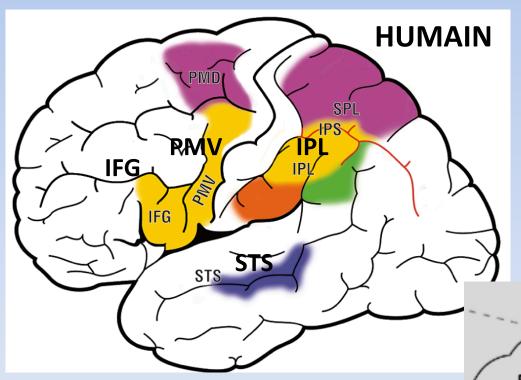
« Circuit central du processus d'imitation »

- (1) Principale entrée (visuelle, auditive, par « pensée »): passe par sillon temporal supérieur (STS)
- (2) Activation du système miroir localisé dans:
- le Gyrus Frontal inférieur (IFG)
- le cortex pré-moteur ventral (PMV)
- le lobe pariétal inférieur (IPL)
- homologue de l'aire PF, PFG du singe

Circuit central du processus d'imitation

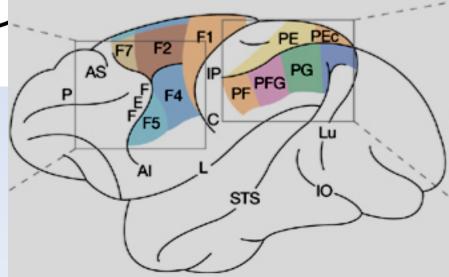


Circuit central du processus d'imitation

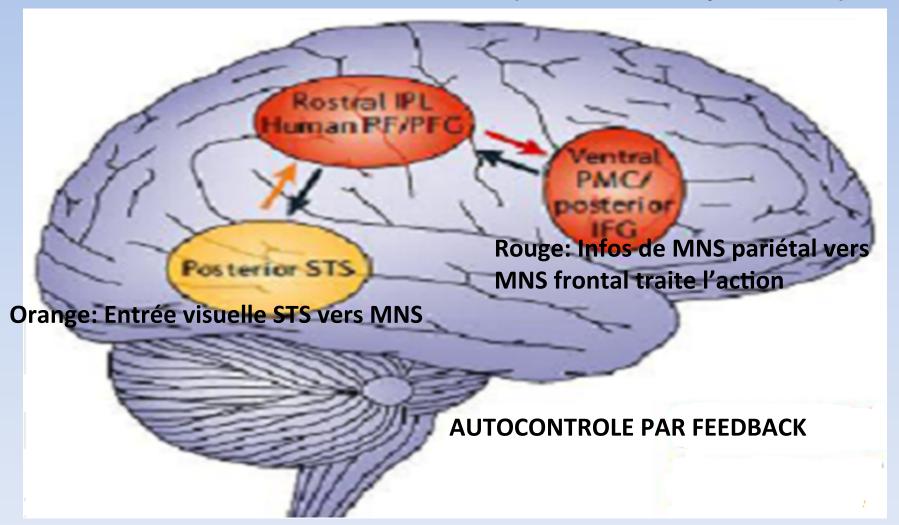


ACTIVATION DES MEMES CIRCUITS

SINGE



CIRCUIT FRONTO-PARIETAL (Iacoboni et Drapetto 2006)



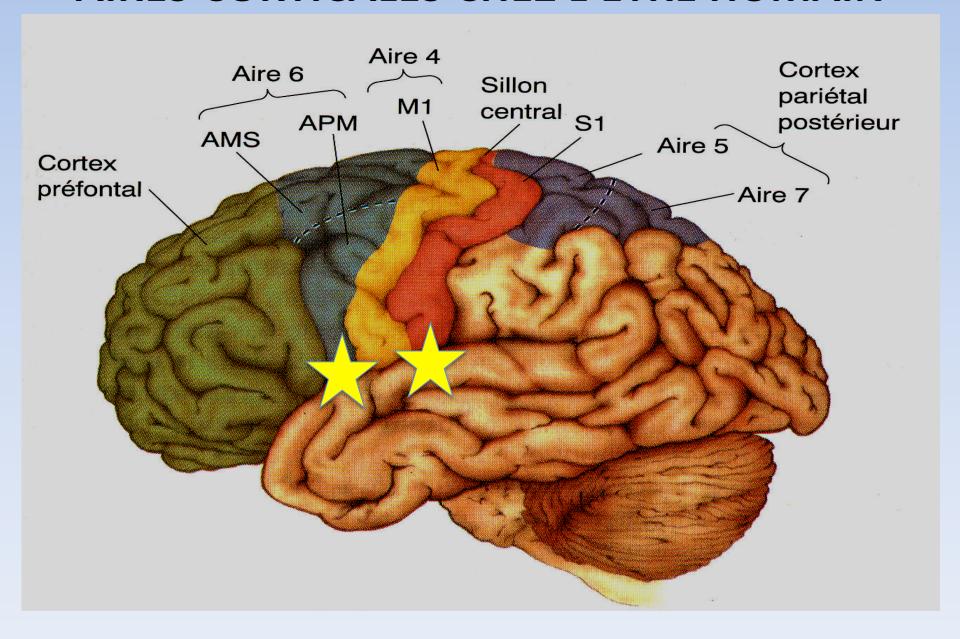
Noir: copies des commandes motrices de l'imitation vers STS pour correspondances entre prédictions sensorielles du plan moteur et description visuelle de l'action.

Comment intervient le « système miroir » dans l'organisation de l'acte moteur

L'acte moteur s'organise en « séquences motrices hiérarchisées», à partir des « neurones canoniques » du lobe frontal.

Le lobe frontal est composé de 3 régions le « cortex préfrontal », le « cortex pré-moteur » et le « cortex moteur primaire »

AIRES CORTICALES CHEZ L'ETRE HUMAIN



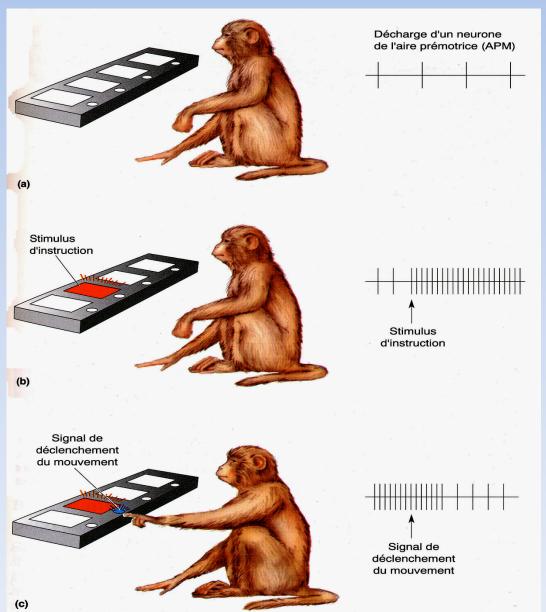
MISE EN JEU DU CIRCUIT FRONTO-PARIETAL

Les informations arrivent par les aires pariétales postérieures puis se transmettent vers le cortex frontal. Activation du cortex pré-moteur (aire 6) qui organise la séquence motrice.

Activation de l'aire motrice primaire (aire 4 ou M1) (somatotopie) qui **exécute** le geste.

Chez le singe éveillé, l'enregistrement des neurones de l'aire 6 montre une *augmentation de leur activité*800ms avant le déclenchement d'un mouvement.

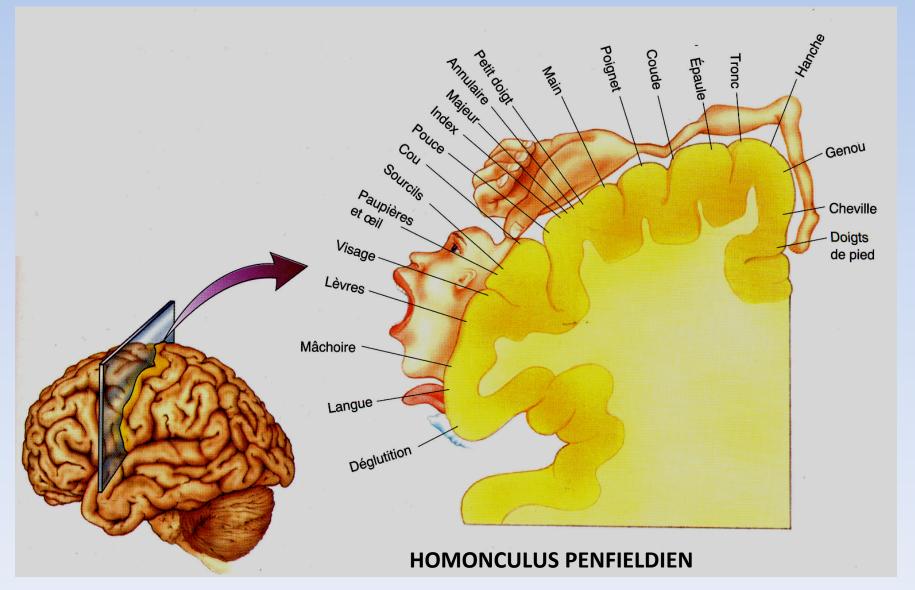
DECHARGE D'UN NEURONE DE L'AIRE PREMOTRICE AVANT LE MOUVEMENT



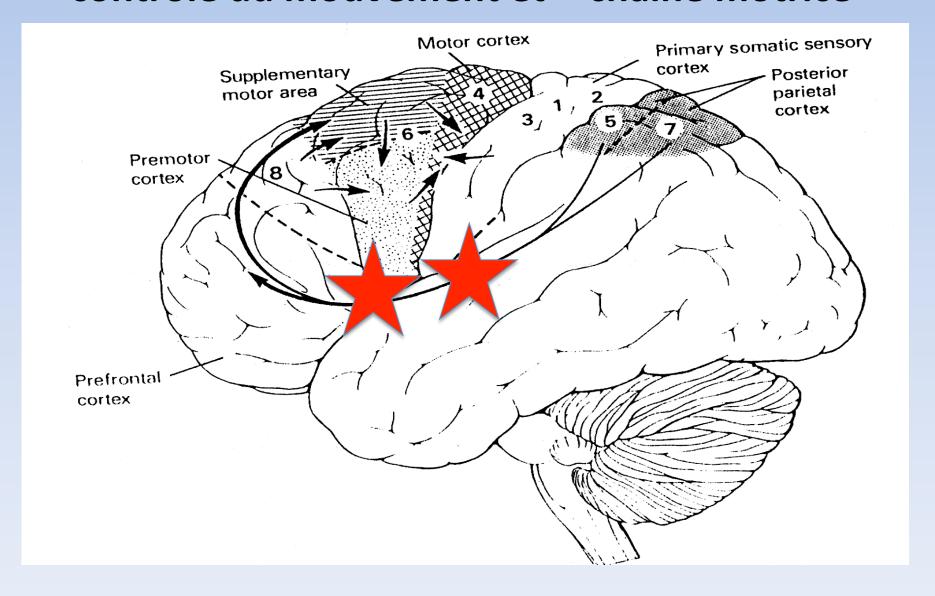
Les neurones de l'aire 6 augmentent leur activité 800ms avant le début du mouvement.

La présence des neurones miroir constitue avec l'aire 6 un « système de contrôle» de l'action motrice.

Cortex moteur primaire. Aire 4 ou aire M1. Organisation Somatotopique



CIRCUIT FRONTO-PARIETAL contrôle du mouvement et « chaîne motrice »



ROLE DES NEURONES MIROIRS

rôle principal des neurones-miroirs: comprendre les gestes moteurs effectués par autrui en les comparant à son répertoire moteur propre.

Ce système permet au cerveau d'un individu de faire un lien entre son propre programme moteur et l'action motrice réalisée par un autre individu.

NEURONES MIROIR ET CORTEX PREMOTEUR

Les neurones miroirs du Cortex Pré-moteur s'activent chaque fois qu'un sujet construit une représentation interne d'un acte moteur effectué par un autre sujet, même s'il ne voit pas le déclenchement de l'action mais possède suffisamment d'indices pour comprendre son but ou encore quand il reconnait une action à partir de son seul bruit.

NEURONES MIROIR ET IMITATION

Le système code l'action observée en terme moteur et **permet sa reproduction**.

MAIS

comme chez le singe, pour que l'activation du système miroir de l'observateur soit efficace, il faut que

les actes moteurs soient déjà présents dans le répertoire moteur de l'observateur.

NEURONES MIROIRS et REPERTOIRE MOTEUR

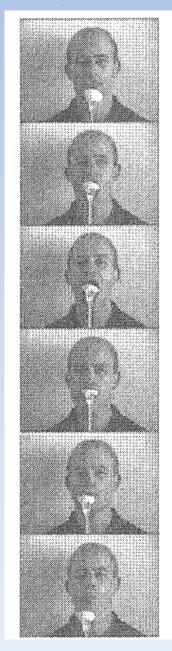
Preuve expérimentale (IRMf) que l'action fait partie du *répertoire moteur* de l'observateur:

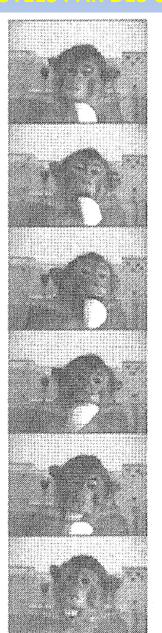
Présentation à des volontaires des actions orales exécutées par des humains, des singes, des chiens:

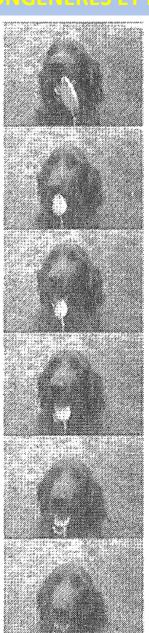
Le circuit fronto-pariétal est

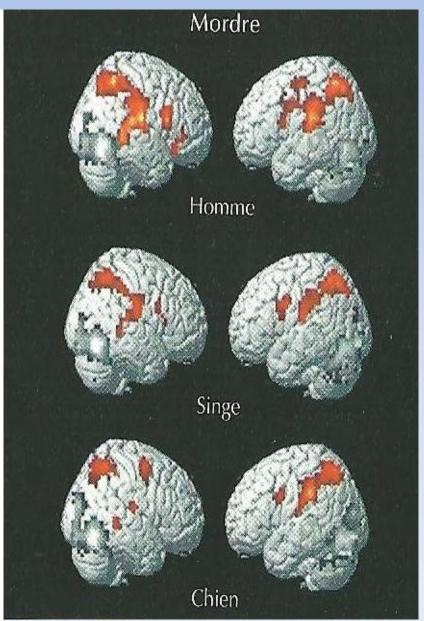
- Activé lors d'actions faisant partie du répertoire moteur réalisées par un être humain ou non-humain (mordre pour manger).
- *Non activé* lorsque l'action appartient à une autre espèce (aboyer).

COMPARAISON DES ACTIVATIONS CORTICALES CHEZ L'HOMME DANS L'OBSERVATION D'ACTIONS EXECUTEES PAR DES CONGENERES ET DES INDIVIDUS D'AUTRES ESPECES



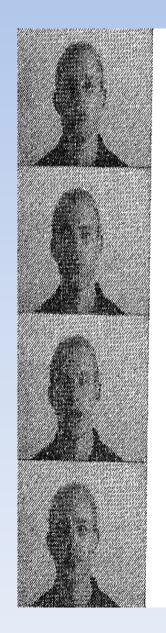


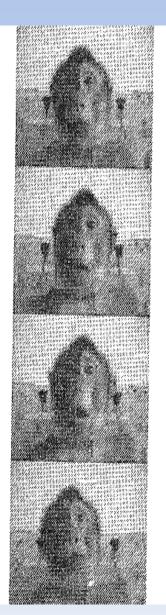


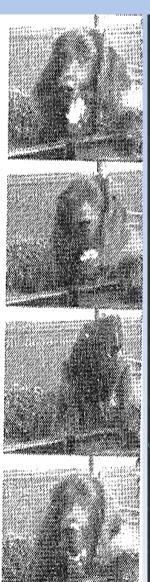


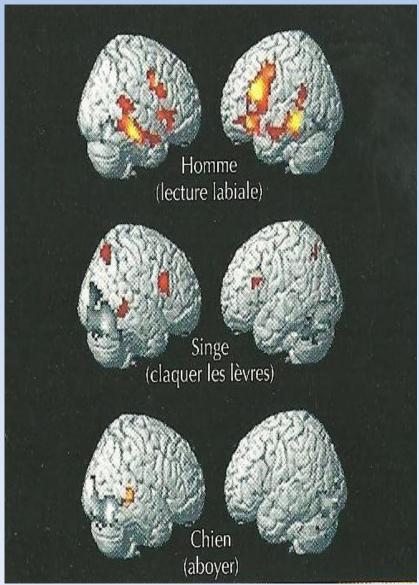
Buccino et al 2004

COMPARAISON D'ACTES COMMUNICATIFS ORAUX. PAS D'ACTIVATION POUR « ABOYER »









NEURONES MIROIRS ET EXPERIENCE MOTRICE

L'activation du système miroir est aussi liée à l'expérience motrice de l'observateur d'une action donnée.

Expériences utilisant des pas de danse comme stimuli observés.

L'activation des neurones miroirs de danseurs professionnels de sexe masculin est plus marquée s'ils observent des pas de dance qui leur sont spécifiques plutôt que ceux effectués par les danseuses et vice versa.

NEURONES MIROIRS ET EXPERIENCE MOTRICE

- (1) L'activité miroir de l'observateur est corrélée à son degré d'habileté pour cette action
- (2) Effet *non lié à la simple familiarité visuelle* avec les stimuli.

L'activation du système moteur des neurones miroirs est *modulée non par l'expérience visuelle mais par la pratique motrice.*

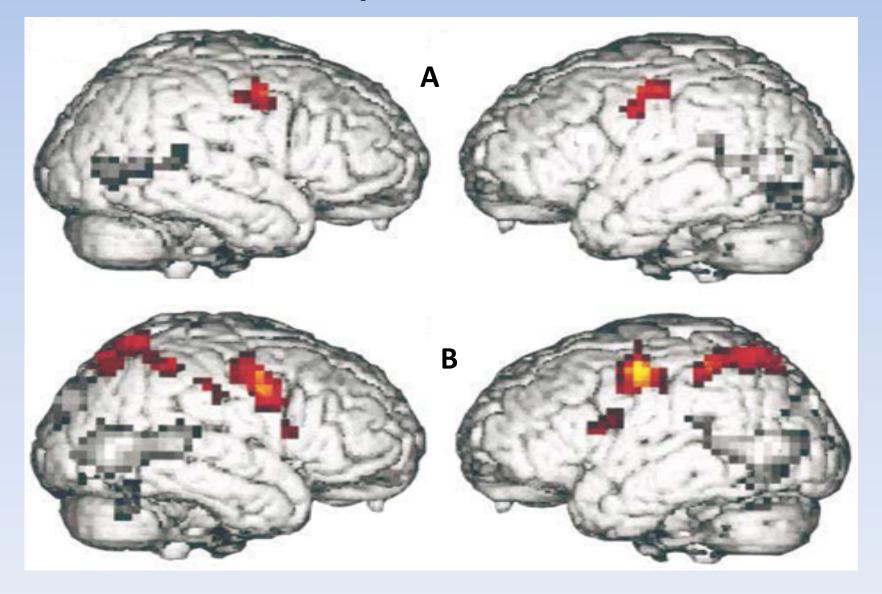
Il faut voir et agir

SYSTÈME MIROIR ET APPRENTISSAGE

Système miroir et Apprentissage par imitation

- Activation du système miroir *plus forte* lors *de l'imitation* d'un geste renforçant un pattern moteur,
 que lors de la simple observation de ce geste.
- Activation corticale unilatérale lors de l'observation seule d'une action
- Activation corticale bilatérale lors de l'imitation du geste

A: observation simple. B: exécution imitation



SYSTÈME MIROIR ET APPRENTISSAGE

Système miroir et *Apprentissage par imitation* : (IRMf) (nombreuses expériences humaines)

Activation du système miroir observée:

- Lors d'entraînement de danseurs dans l'apprentissage de nouveaux pas.
- Non seulement lors de *la simple imitation d'un acte moteur* mais aussi lors de *l'apprentissage d'un nouveau type d'action*.
- Lors du moment précédant l'imitation motrice (MEG)

NEURONES MIROIRS ET INTENTION

La compréhension du geste n'est pas la seule fonction des neurones miroirs.

Les neurones miroirs permettraient de comprendre le <u>but de l'action observée</u>

Exemple: la plupart des neurones miroir liés à la main du *lobe pariétal inférieur (IPL)* codent différemment le même acte moteur quand il est incorporé dans différentes actions:

saisir un fruit - à manger

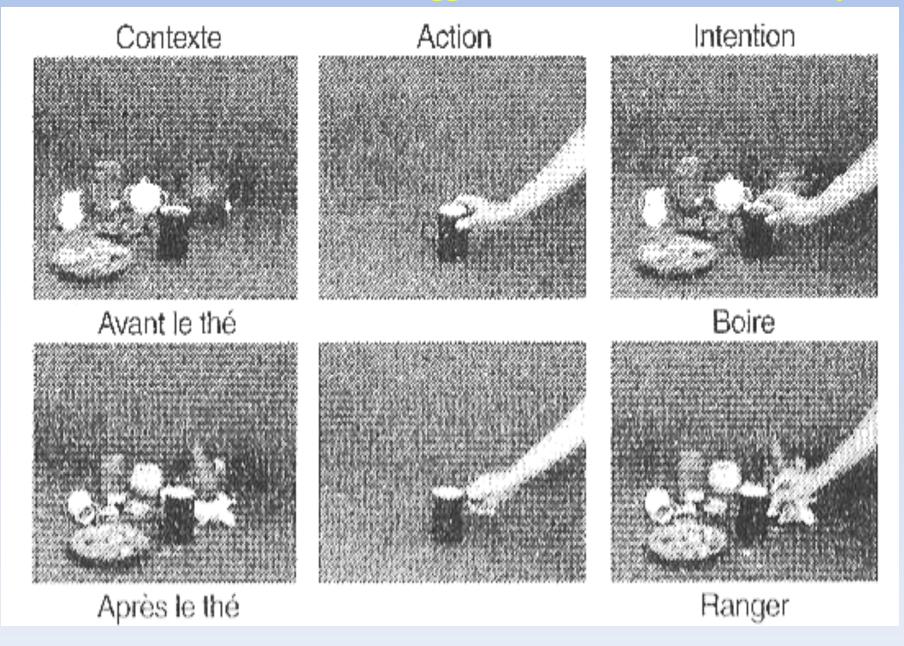
- à placer dans une corbeille

NEURONES MIROIRS ET « INTENTION »

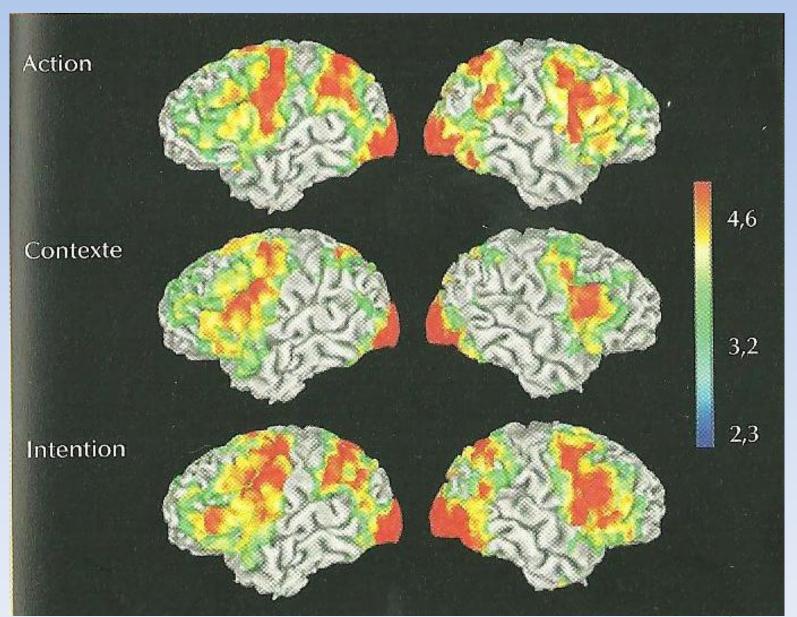
Le système miroir permet de comprendre aussi l'intention motrice avant même la fin de cette action.

Expérience de 3 films observés par des volontaires dans 3 situations différentes

Dans « intention » la main suggère « boire le thé » ou nettoyer



Comparé au repos, une forte activation du système miroir frontal inférieur dans le (3) et plus marquée dans le contexte « avant le thé » avec pince



SYSTÈME MIROIR ET APPRENTISSAGE CHEZ L'ENFANT

Le système miroir est en place dès le plus jeune âge. Le système miroir est activé même en l'absence d'expérience motrice à condition d'avoir le répertoire.

Des bébés dès l'âge de 3 mois activent leur système miroir après un entraînement spécifique consistant à agripper un objet à travers des gants en velcro. Ce résultat indique l'importance du rôle du système miroir dans *l'apprentissage dès le plus jeune âge*.

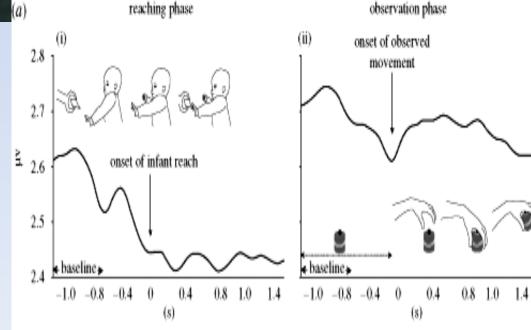


Etude EEG bébé 9 mois:

- (1) Atteint un jouet
- (2) Observe une main prendre l'objet.

Mesure atténuation du rythme α

(1) Atténuation du rythme(2) débute avant mêmel'exécution du geste



SYSTÈME MIROIR ET APPRENTISSAGE CHEZ L'ENFANT

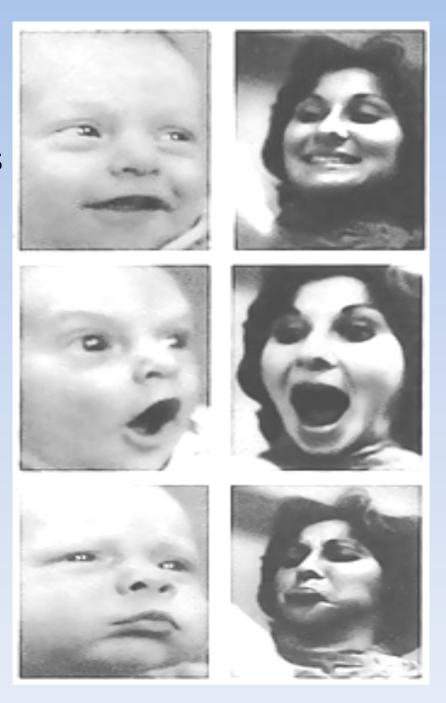
Du point de vue neurophysiologique, l'apprentissage par imitation est lié à une représentation motrice déjà existante.

Cette représentation motrice existe dés la naissance.

Patterns moteurs préexistants

Bébé 2 mois. Les observations comportementales humaines suggèrent que le SP « renforce » l'activation des réseaux neuronaux nécessaires aux Comportements innés. Expressions faciales de nourrisson en réponse à

l'expérimentateur



SYSTÈME MIROIR ET RESONANCE

Les neurones miroir

- codent les actes moteurs transitifs et intransitifs, les modalités et moments de réalisation d'une action mais aussi
- contrôlent leur exécution

Le système miroir « fronto-pariétal » fonctionne comme un *mécanisme de « résonance »* qui coordonne

l'activité des *mêmes aires cérébrales* entre un sujet et un observateur.

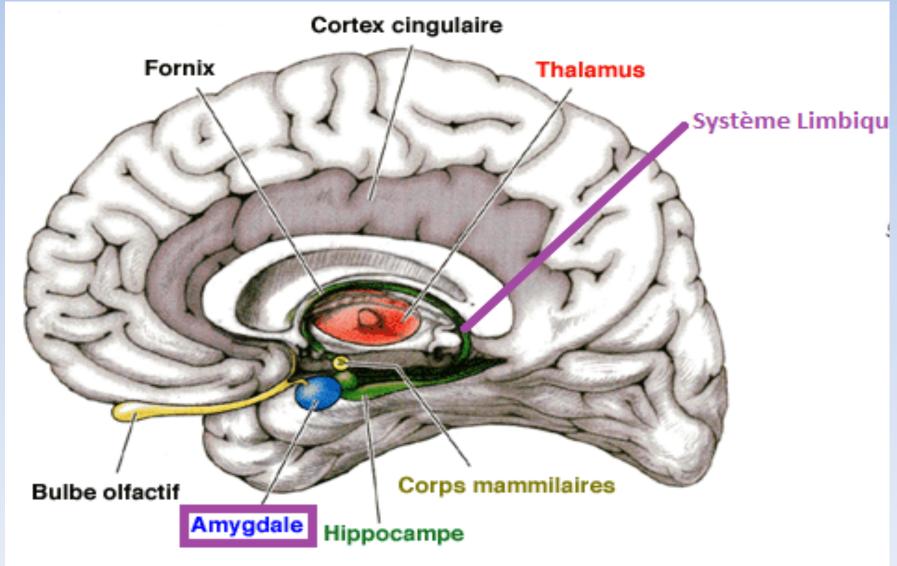
SYSTÈME MIROIR ET SYSTÈME LIMBIQUE

Le **système limbique** occupe le centre du cerveau et définit un groupe de structures ayant un rôle très important dans l'olfaction, la régulation de diverses émotions (peur, agressivité, plaisir) ainsi que dans les **processus de mémoire et la faculté d'apprentissage.**

Le système **miroir limbique** (Insula et frontal mésial) est dédié à la

reconnaissance du comportement affectif.

SYSTÈME MIROIR ET AFFECTIVITE. Système Limbique



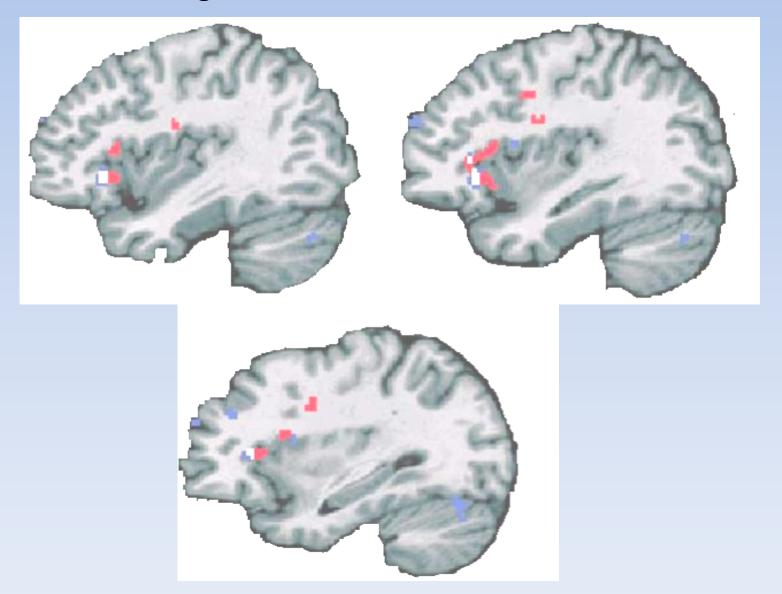
SYSTÈME MIROIR ET SYSTÈME LIMBIQUE

Il a été montré par IRMf que la partie antérieure de l'Insula et du cortex cingulaire de l'hémisphère droit est activée aussi bien

- Lorsqu'une personne éprouve du dégoût
- Qu'à la vue d'une personne exprimant du dégoût.

L'importance des activations du cortex insulaire est liée au degré de dégoût exprimé par le visage observé.

Bleu: odeurs nauséabondes. Rouge : vue autrui avec expression de dégoût . Blanc: surfaces communes



SYSTÈME MIROIR ET DOULEUR

Preuves expérimentales de 2 types:

(1)En électrophysiologie:

des enregistrements d'activité neuronale de la région antérieure du cortex cingulaire montrent que certains neurones répondent aussi bien lors de l'application de stimuli douloureux sur la main que lors de l'observation de ces mêmes stimuli appliqués sur d'autres personnes.

Expérience confirmée par études en IRMf

SYSTÈME MIROIR ET DOULEUR

Résultats de ces expériences:

dans ces deux conditions, on constate *une activation du système limbique* (insula antérieure et cortex Cingulaire).

La perception directe de la souffrance comme son évocation sont liées à un mécanisme miroir de l'empathie (identique au « dégoût »).

Il est donc possible de partager une émotion sans que le réseau cortical passe par un système moteur.

Mécanisme de compréhension d'autrui

SYSTÈME MIROIR ET EMOTIONS

Le système miroir *des émotions permettrait de simuler l'état émotionnel d'autrui* dans notre cerveau, de mieux identifier les émotions éprouvées par les autres et joue un rôle important dans **l'empathie**.

L'activité des neurones miroir est assimilée à un **mécanisme de « résonance »** qui coordonne l'activité des mêmes aires cérébrales entre un sujet et un Observateur par le système limbique.

Système miroir et mécanisme de compréhension d'autrui



SYSTÈME MIROIR ET LANGAGE

Les neurones miroir ont -ils un rôle dans le langage? Hypothèse pour certains:

Les neurones miroirs *seraient les « promoteurs du langage »* ils expliquent pourquoi nous parlons avec nos mains.

La preuve serait « anatomique »

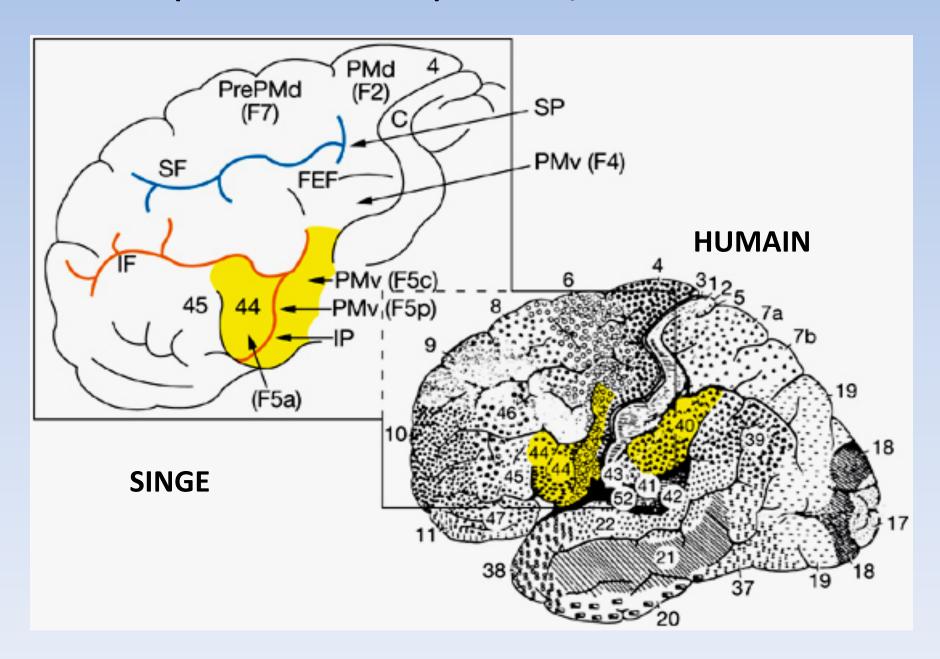
SYSTÈME MIROIR ET LANGAGE

Dans la correspondance anatomique singe/humain du système miroir l'aire F5 du singe correspond à l'aire 44 (Broca).

Or à l'aire 44 (Broca) est aire motrice du langage située sur le plan anatomique à l'avant de l'aire pré-motrice.

De même l'aire pariétale inférieure (IPL) correspond à l'aire 40 de Brodman, proche de l'aire de Wernicke

Correspondance anatomique aire F5/aire 44 de Broca



AIRES DU LANGAGE CHEZ L'HOMME

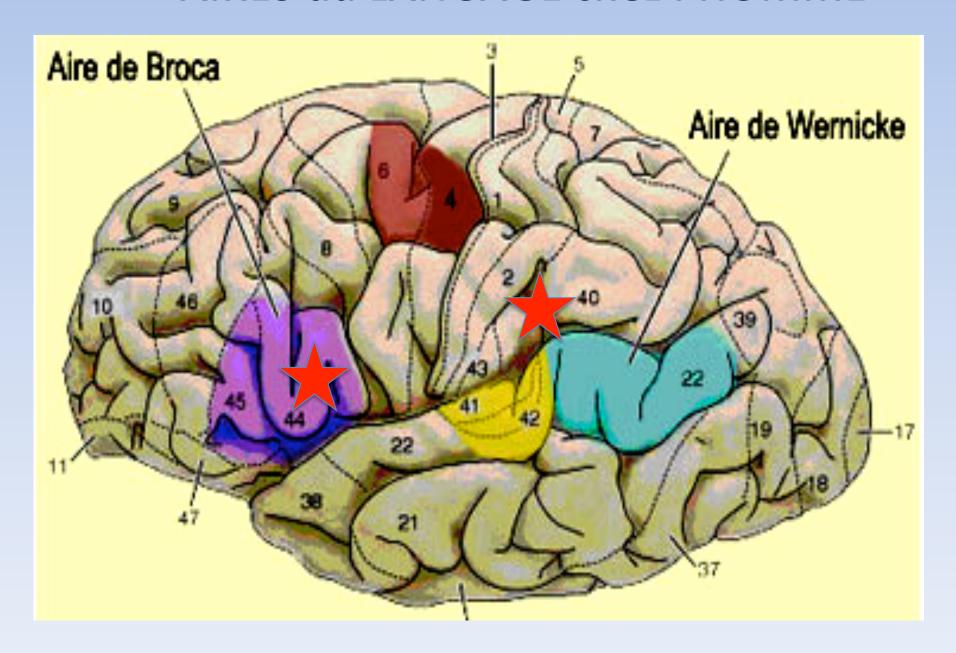
Chez l'Homme, le langage dépend de deux régions classiquement localisées dans l'hémisphère gauche: L'aire motrice de Broca: siège de la *production du*

langage

L'aire de Wernicke: siège de la compréhension.

Proches de l'aire de l'audition.

AIRES du LANGAGE chez l'HOMME



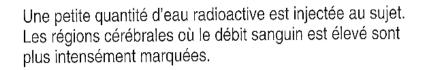
NEUROPHYSIOLOGIE DU LANGAGE

- (1) Une mot provenant des oreilles arrive à l'aire auditive, mais pour comprendre le mot, le signal doit atteindre l'aire de Wernicke.
- (2) Pour prononcer un mot, la transmission d'une représentation de ce mot (par faisceau arqué) est nécessaire de l'aire de Wernicke à l'aire de Broca.
- (3) Dans l'aire de Broca, le mot suscite l'élaboration d'un **programme détaillé en vue de son articulation**, qui est transmis <u>à l'aire du visage dans le cortex</u> moteur.

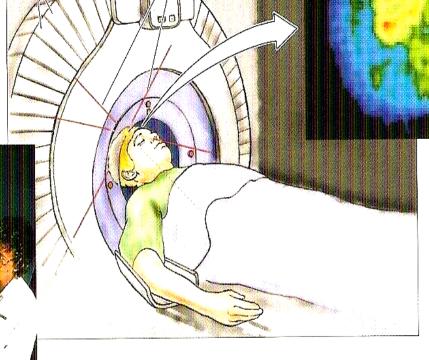
NEUROPHYSIOLOGIE DU LANGAGE

Classiquement l'aire motrice du langage est considérée comme le *centre moteur du langage* dirigeant les muscles de la langue, de la gorge et des lèvres associées à l'articulation et ne se trouvait que dans un seul hémisphère (gauche, chez les droitiers). Cette notion classique est remise en question par des études en tomographie par émission de positons (TEP: mesure du flux sanguin) qui montrent que l'aire motrice du langage a peut-être d'autres fonctions.

ETUDE DU LANGAGE EN TEP



Détecteurs de photons



Photons

Hank Morgans/Science Source/Photo

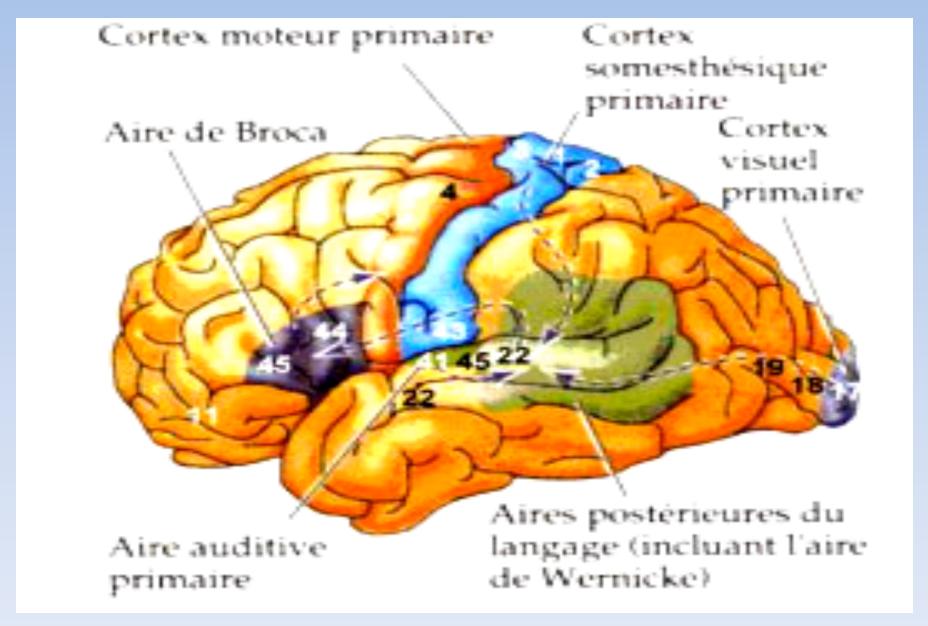
Des positons sont émis du fait de la radioactivité. Ils entrent en collision avec des électrons du cerveau, ce qui induit la production de photons (une forme d'énergie) ; ces photons sortent de la tête et sont détectés par l'appareil de TEP.

Hank Morgans/Science Source/Photo Researchers

NEUROPHYSIOLOGIE DU LANGAGE

L' aire de Broca s'active *lorsqu'on se prépare* à parler, voir lors d'activités motrices volontaires autres que la parole et aussi lors d'une tâche de « discrimination » de sons.

Les études en TEP et IRMf ont développé la conception d'une zone du langage reposant sur *l'existence de réseaux interconnectés*.



sujet prononce à haute voix un verbe (consigne de l'associer ou non à un nom entendu)

SYSTÈME MIROIR ET LANGAGE. Hypothèse motrice

Comment le système miroir intervient sur l'organisation du langage?

Les défenseurs de cette théorie s'appuient sur l'importance de l'activité oro-motrice dans l'émission des sons.

Les vraies unités de la parole ne sont pas les sons mais les patterns articulatoires qui auraient évolué exclusivement au service du langage humain.

SYSTÈME MIROIR ET LANGAGE Hypothèse motrice

La production et la perception de la parole s'appuient sur *un répertoire commun* d'actions primitives *motrices*, permettant la génération de gestes oro- faciaux.

Ce répertoire est activé dans le cerveau de l'auditeur lors

de la perception de parole, grâce à *un mécanisme de « résonance » audio-motrice* selon une boucle perception/action dans le traitement auditif de la parole.

SYSTÈME MIROIR ET LANGAGE

Les études d'IRMf et de TMS montrent

- une activation de l'aire 44 de Broca lors de l'écoute de sons
- une activation du système miroir moteur lorsqu'on écoute et on regarde un sujet parler.

La perception de la parole produirait automatiquement et de façon spécifique une représentation motrice des gestes articulatoires perçus.

L'auditeur comprend le locuteur grâce à *l'activation de* représentations motrices articulatoires lors de l'écoute de sons de parole

SYSTÈME MIROIR/APPRENTISSAGE et LANGAGE

(1) Le système miroir facilite-t-il l'apprentissage?

Oui certainement

l'apprentissage moteur par imitation.

(2) Le système miroir est-il utilisé dans la compréhension du langage?

Oui au moins par la mise en jeu de l'aire motrice de Broca

LANGAGE

Le système miroir intervient-il dans une double action motrice et langagière favorisant l'apprentissage?

Oui à condition que:

- Les tâche motrice et langagière impliquent un effecteur (une main doit agir sur un objet)
- Le stimulus linguistique est dans le même sens que la prévision motrice.

Il en résulterait que *le geste favoriserait l'apprentissage* du langage

CONCLUSION

Le système miroir nous apporte des données nouvelles sur le fonctionnement complexe du cerveau.

Il ouvre de multiples perspectives dans le domaine de la neurologie, de la psychologie, de la linguistique, de la sociologie, et sans doute de la philosophie.

Merci de votre attention. Vous avez « activé » votre « système miroir »

