

Thème 3 : Corps humain et santé

Chapitre 2 : Motricité volontaire et plasticité cérébrale

I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Mouvements réflexes et mouvement volontaires



Mouvement réflexe



Moelle épinière



Mouvement volontaire



Encéphale

I. La commande volontaire du mouvement

A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées

- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

II. La plasticité cérébrale

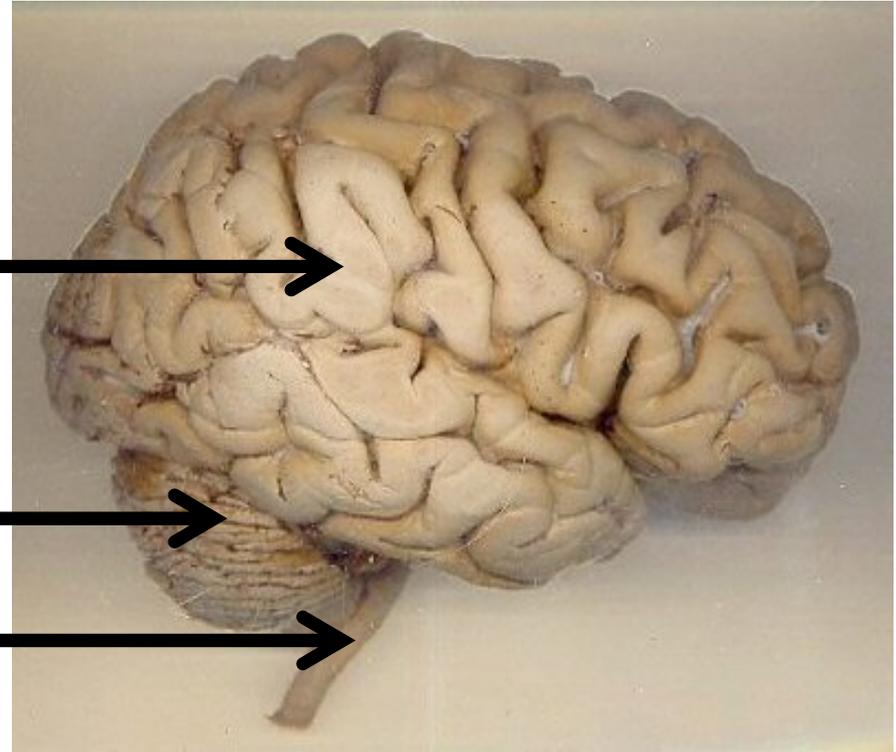
- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Anatomie de l'encéphale

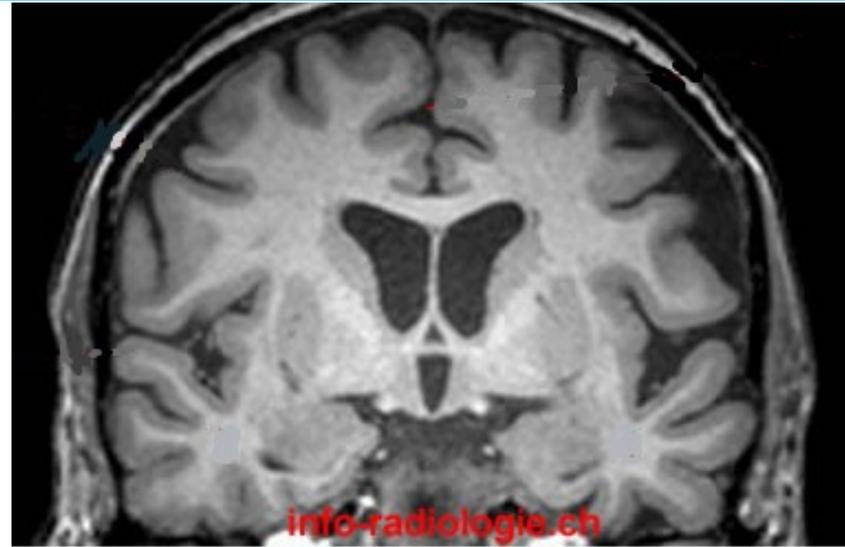
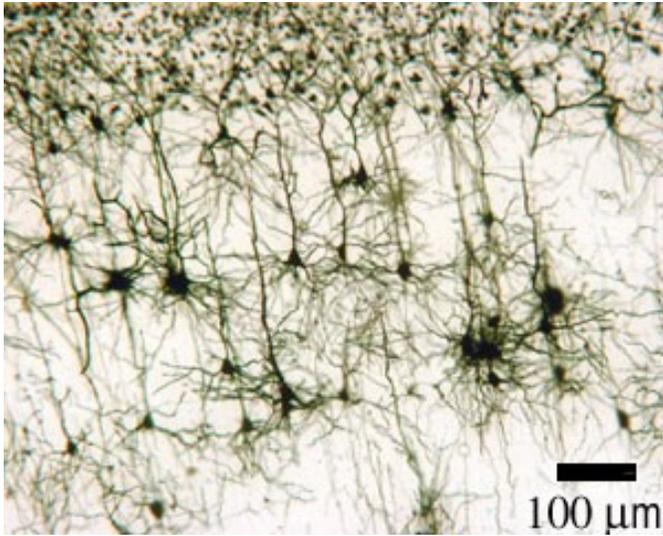
Hémisphère cérébral droit

cervelet

Tronc cérébral

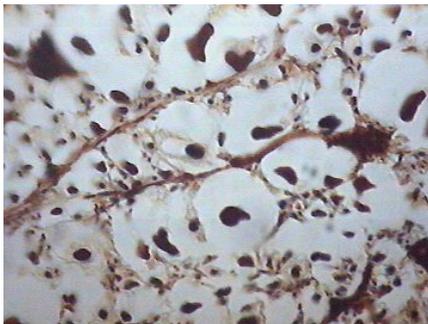
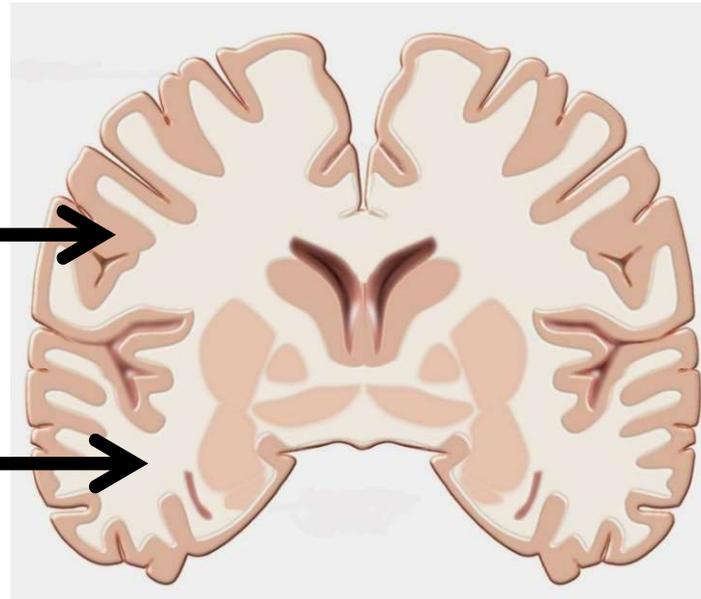


Anatomie du cerveau

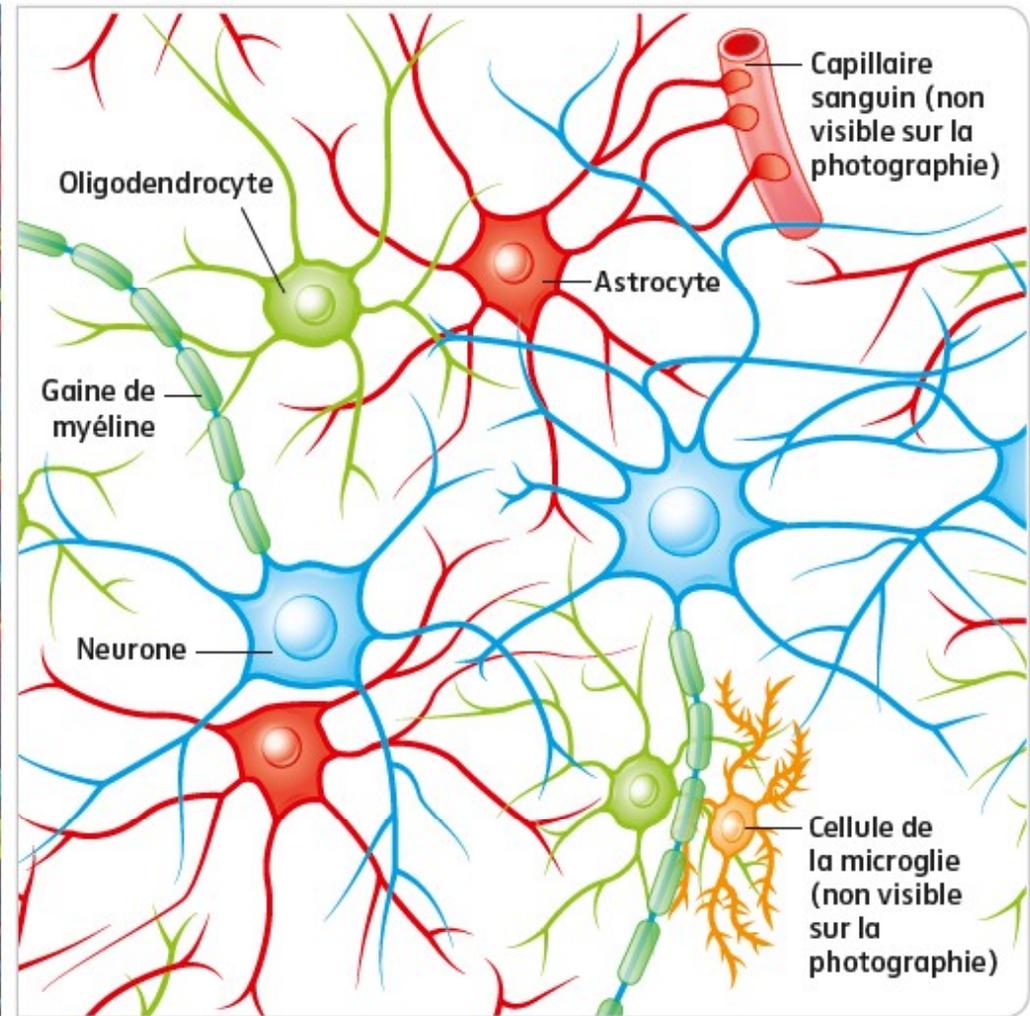
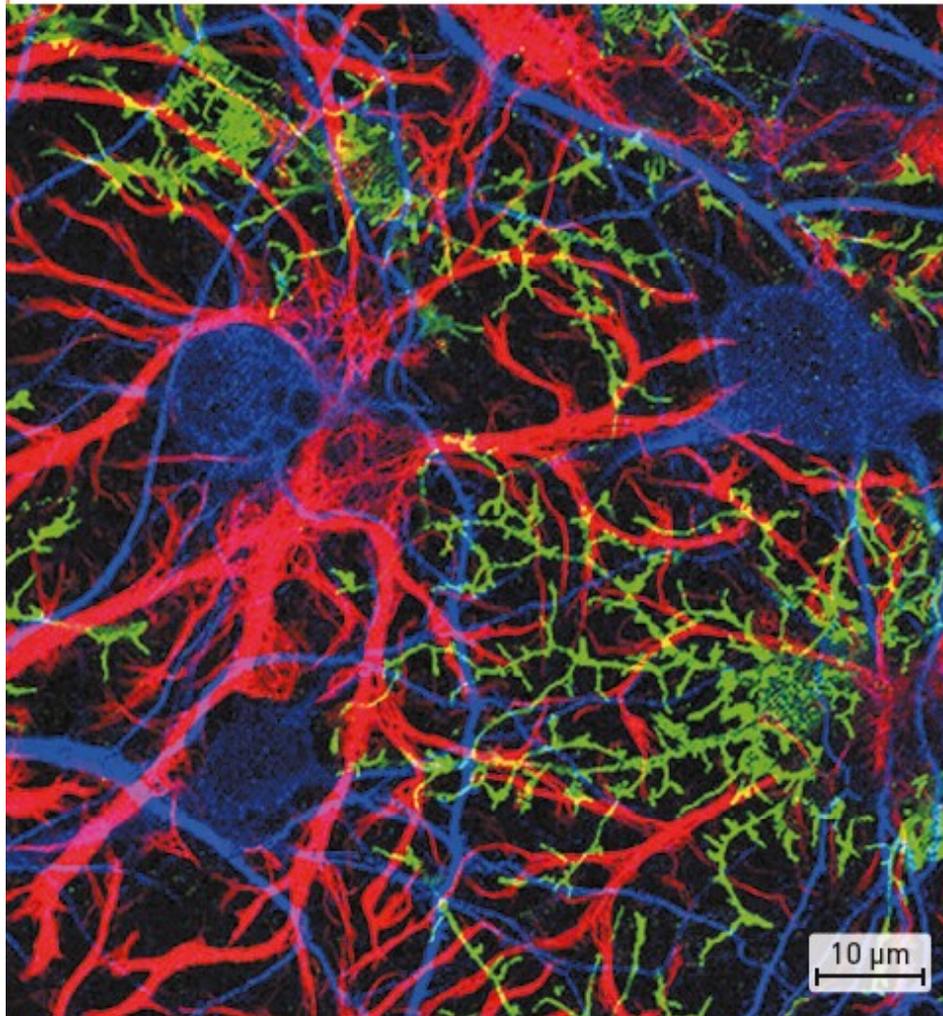


**Cortex cérébral =
substance grise**

Substance blanche



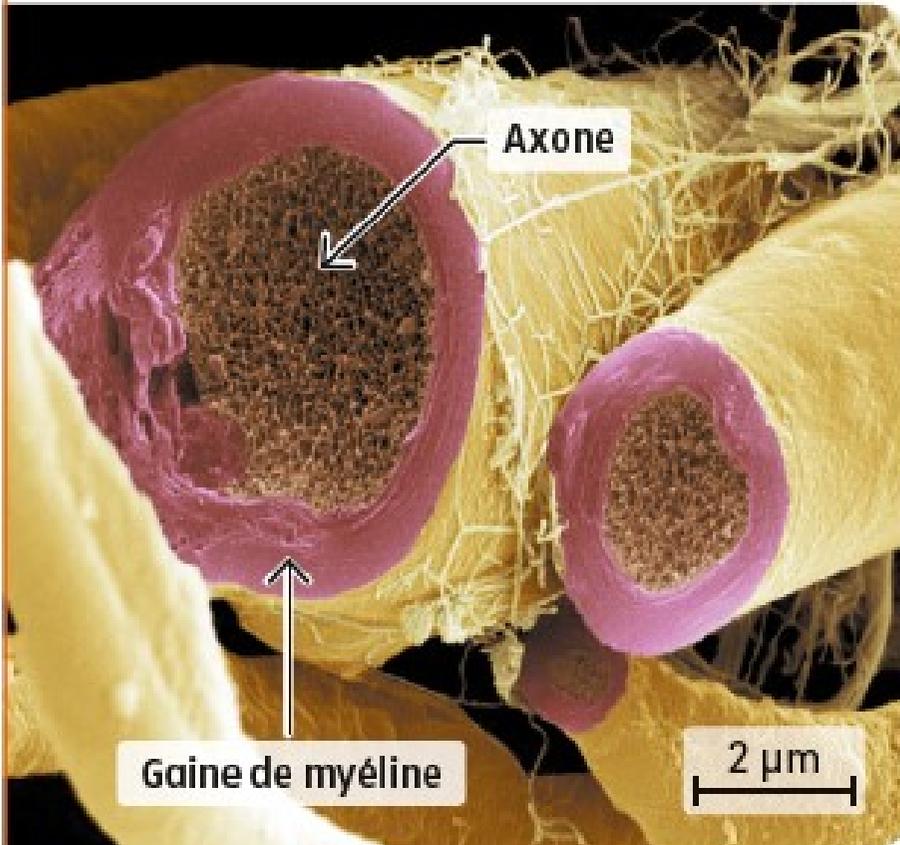
Les cellules du cerveau



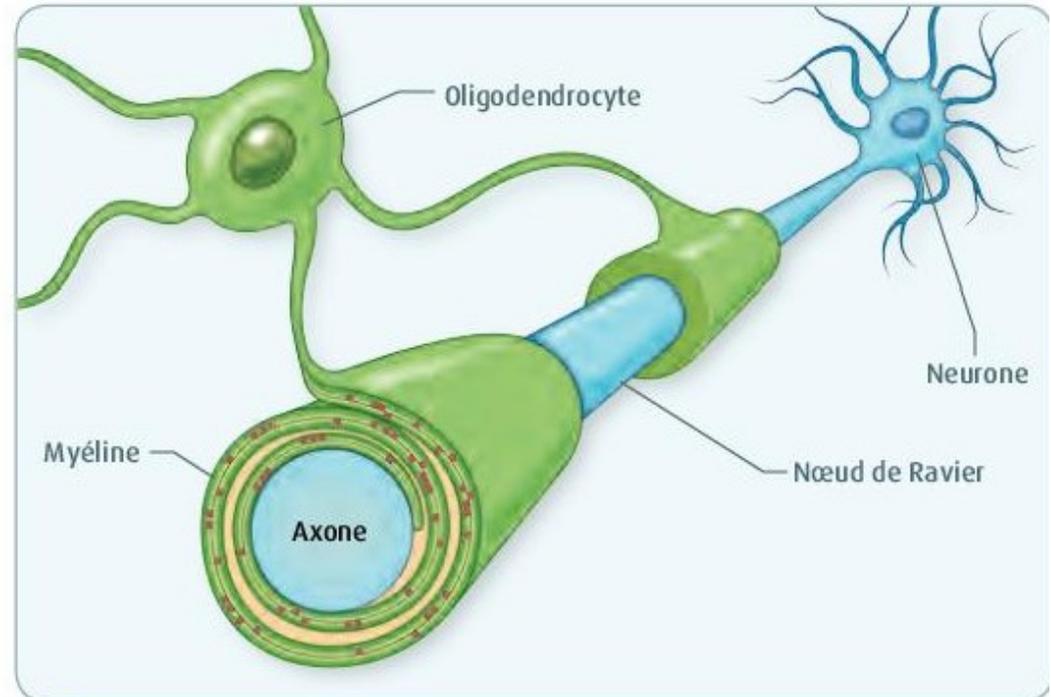
3 Cellules nerveuses en microscopie à fluorescence et schéma d'interprétation.

Les neurones (en bleu) sont associés à trois grands types de cellules gliales : les astrocytes (en rouge), les oligodendrocytes (en vert) et les cellules de la microglie (non visibles sur ce cliché).

Quelques rôles des cellules gliales

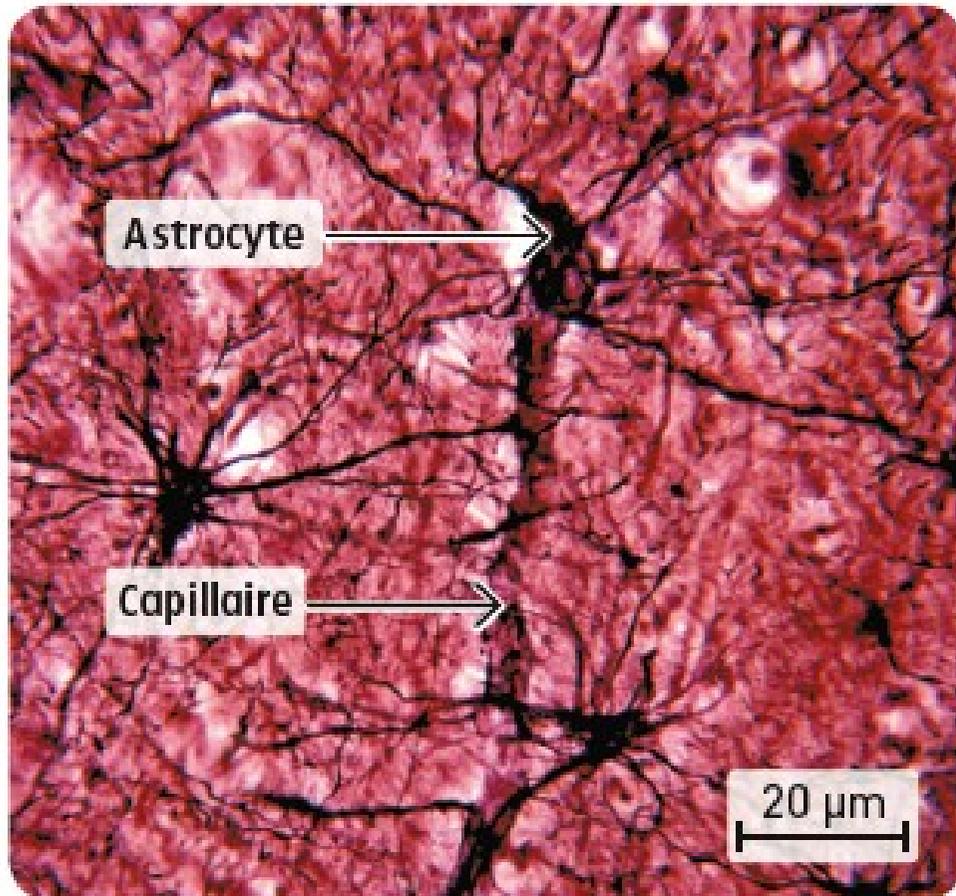


- 4** **Axones de neurones myélinisés, observation au MEB.** La gaine de myéline, synthétisée par les oligodendrocytes, a des propriétés isolantes et accélère ainsi la propagation des messages nerveux.

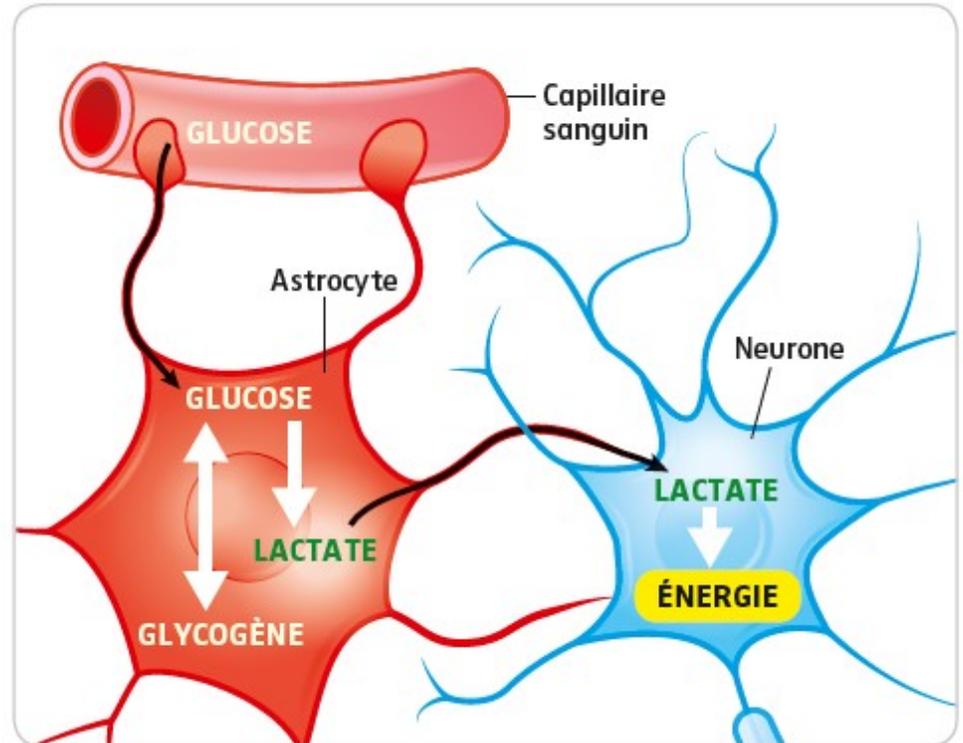


- 5** **Vue en coupe d'un axone de neurone.** Les prolongements cytoplasmiques des oligodendrocytes sont riches en myéline, une molécule principalement constituée de lipide. Ces prolongements s'enroulent autour des axones et forment une gaine de myéline.

Quelques rôles des cellules gliales

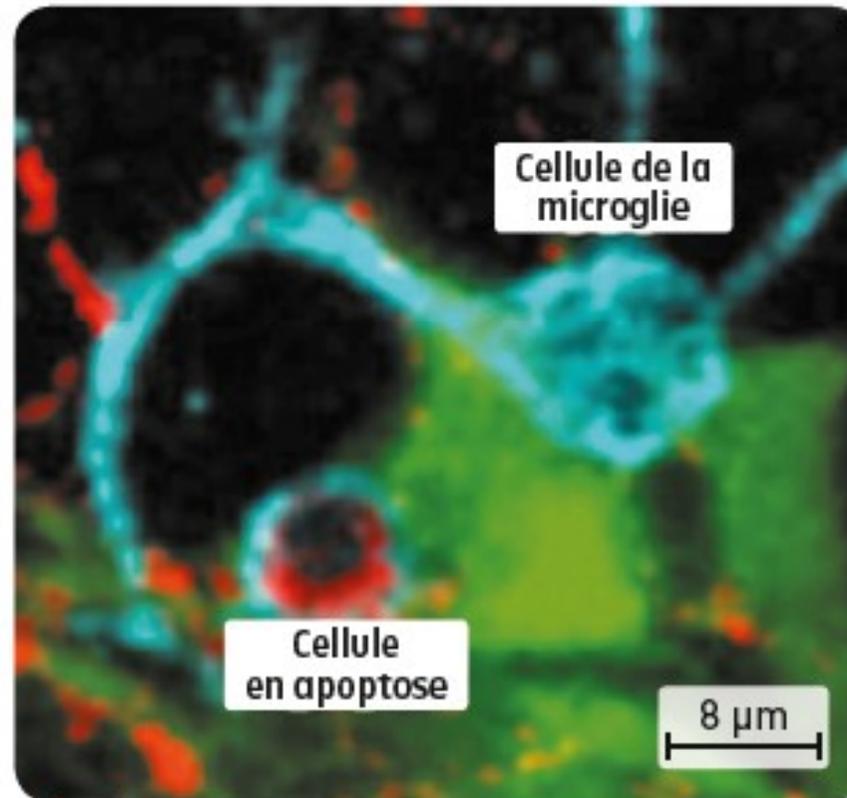


5 Astrocytes en contact avec un capillaire sanguin. Les astrocytes prélèvent du glucose dans le sang, le stockent sous forme de glycogène et le transforment en lactate directement utilisé par les neurones.



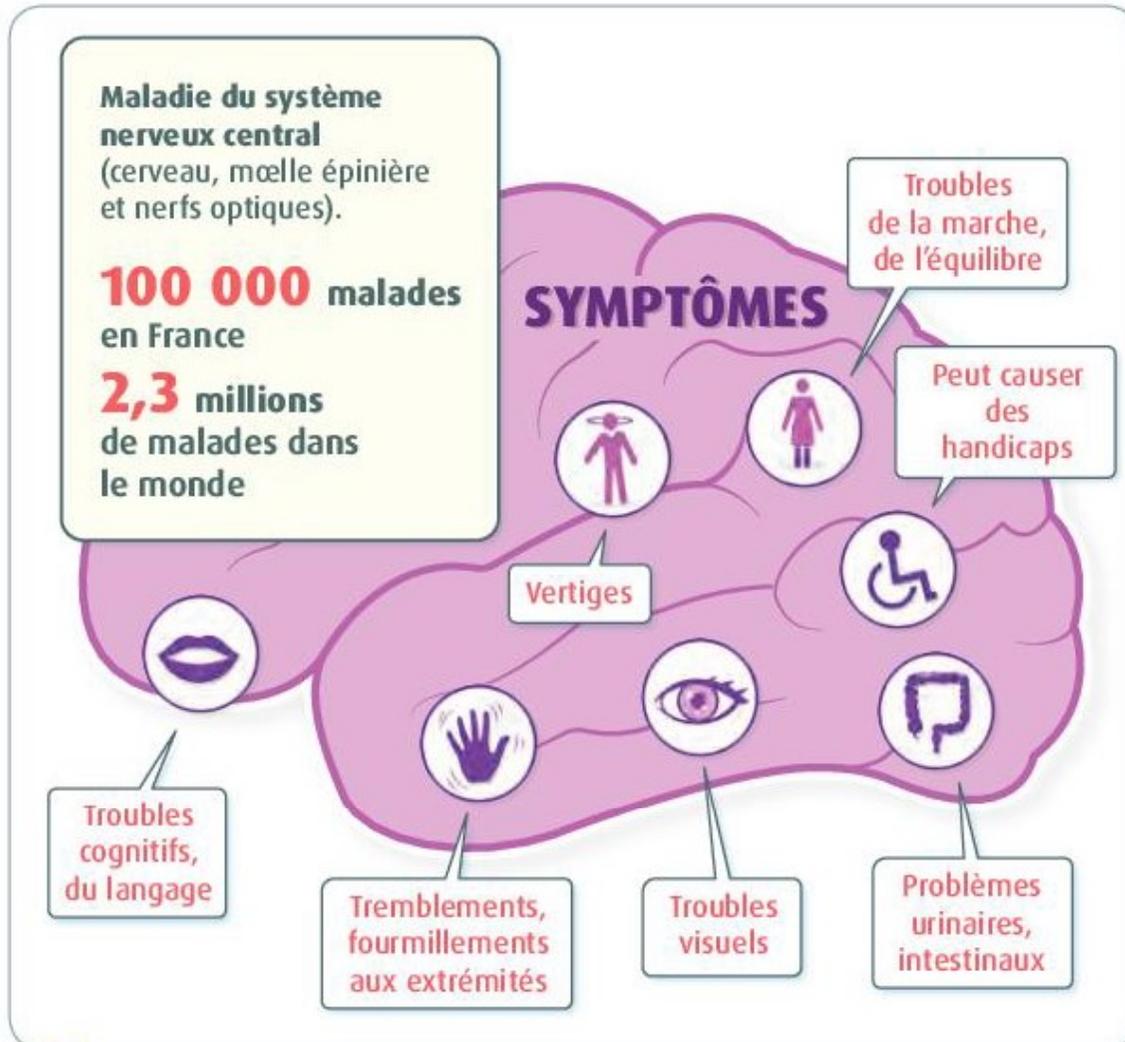
b Un des rôles des astrocytes, un type de cellules gliales.

Quelques rôles des cellules gliales

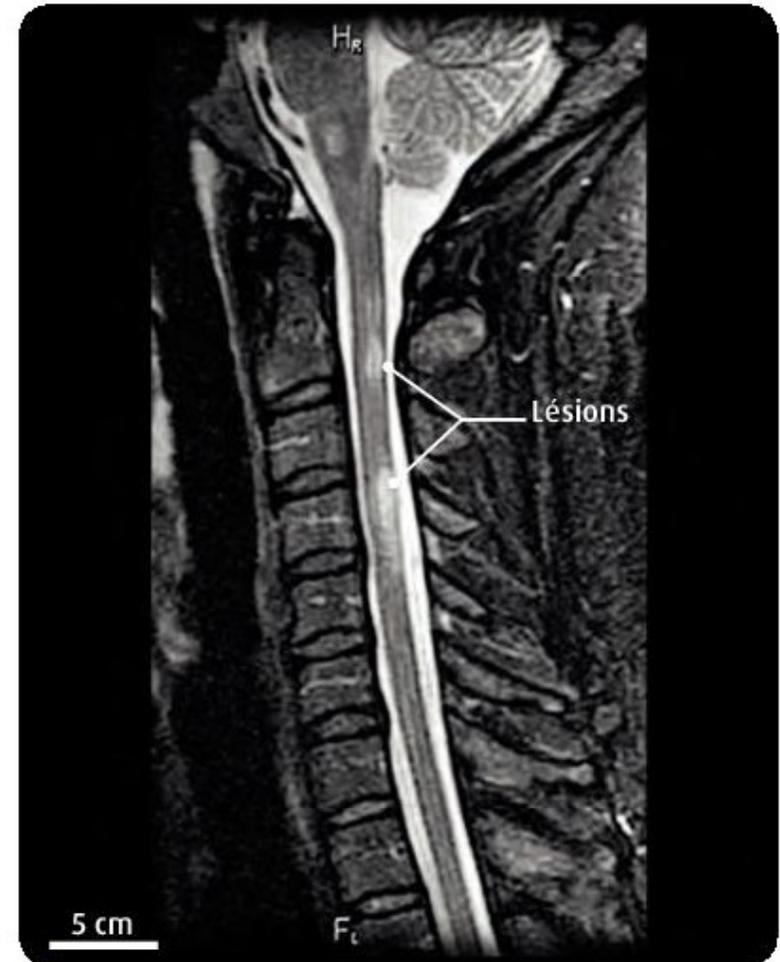


- 6** Cellule de la microglie phagocytant une cellule en apoptose (mort cellulaire). Observation en microscopie à fluorescence. Les cellules de la microglie sont de petites cellules mobiles ; ce sont les macrophages du cerveau.

La SEP

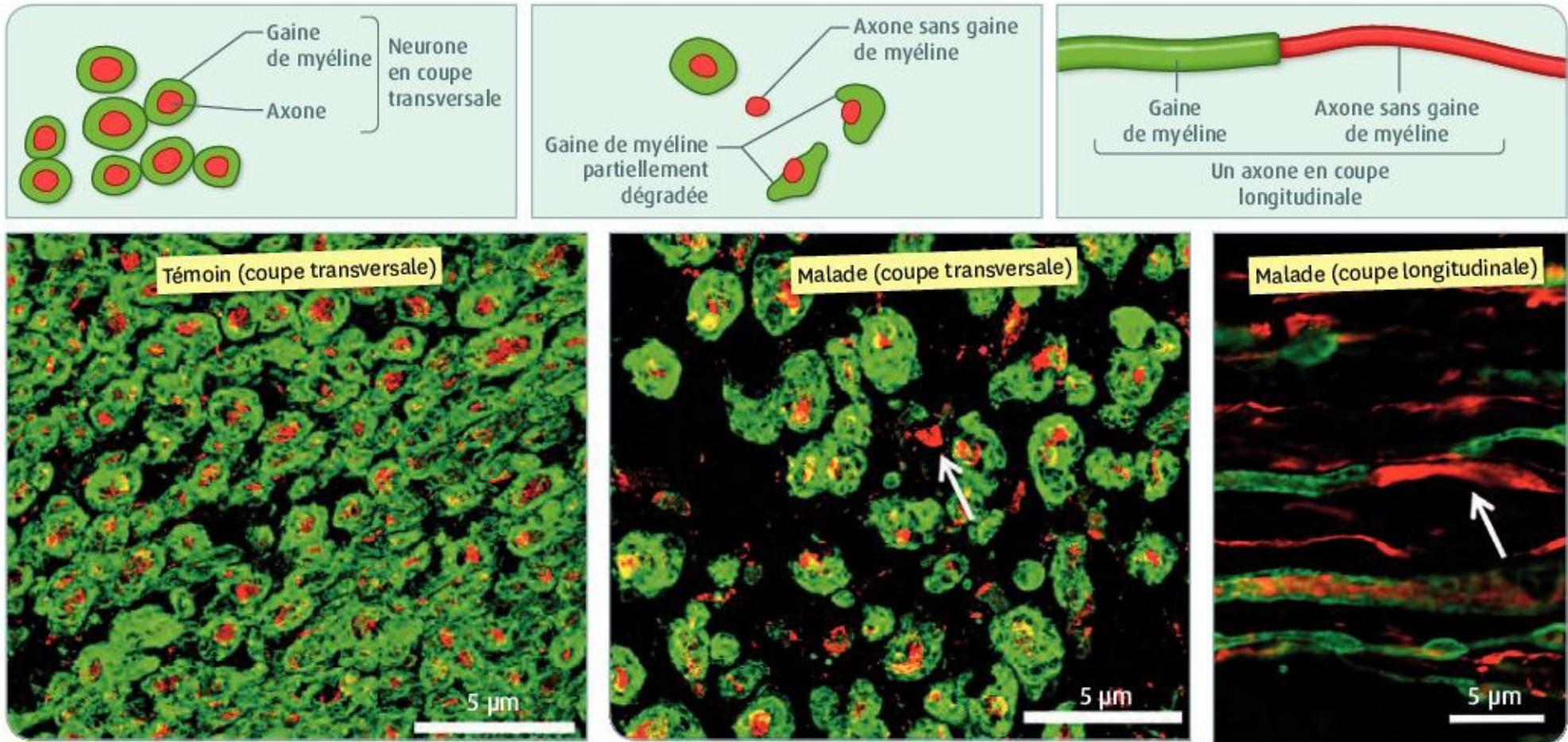


1 La sclérose en plaque.



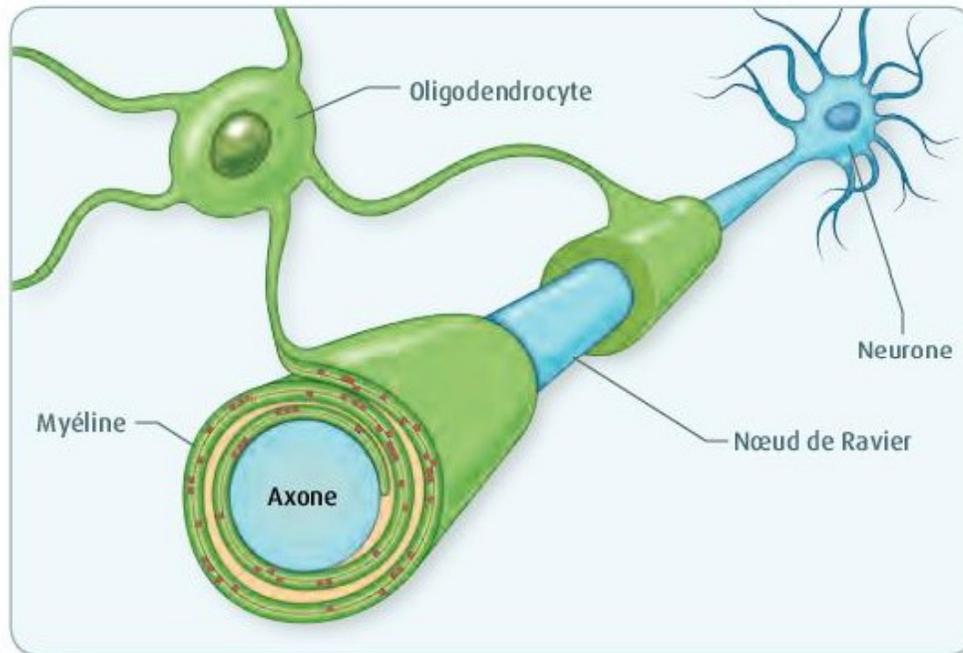
2 IRM de la base du cerveau et de la moelle épinière chez un patient atteint de sclérose en plaque.

La SEP

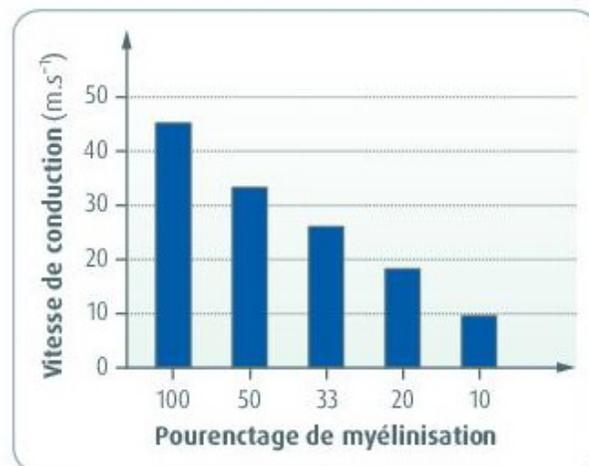


3 **Neurones observés au microscope optique à fluorescence et schémas d'interprétation.** L'axone des neurones du cerveau et de la moelle est entouré d'une gaine de myéline. Chez les malades atteints de sclérose en plaque, cette gaine est progressivement détruite : on parle de démyélinisation.

La SEP



5 Vue en coupe d'un axone de neurone. Les prolongements cytoplasmiques des oligodendrocytes sont riches en myéline, une molécule principalement constituée de lipide. Ces prolongements s'enroulent autour des axones et forment une gaine de myéline.



6 Vitesse de conduction de l'information nerveuse dans des axones normaux et des axones démyélinisés. La valeur 100 % correspond à un axone normalement myélinisé.



Interview de Catherine Lubetzki, directrice de recherche à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM) et lauréate du prix Charcot 2019.

La sclérose en plaques est une maladie auto-immune au cours de laquelle une réaction inflammatoire, associant immunité innée et immunité adaptative, entraîne, dans le système nerveux central, une destruction de la gaine de myéline et une souffrance des axones. Dans la plupart des cas, la maladie évolue au début par une alternance de « poussées » inflammatoires et de phases de rémission. Elle peut aussi évoluer, d'emblée ou secondairement, sous une forme progressive, qui se caractérise par l'absence ou la disparition des poussées, et l'aggravation progressive d'un handicap neurologique irréversible. Les mécanismes impliqués dans l'apparition de cette phase progressive sont incomplètement connus, mais l'insuffisance de réparation de la gaine de myéline (remyélinisation) joue un rôle important. On sait maintenant que les lésions de la maladie (les plaques) touchent non seulement la substance blanche du cerveau et de la moelle épinière (là où prédominent les fibres myélinisées) mais aussi la substance grise et notamment le cortex. Les travaux de recherche développés au sein de l'équipe que je codirige avec Bruno Stankoff à l'ICM sont centrés sur la compréhension de la remyélinisation dans le système nerveux central.



7 Pistes de recherche sur le traitement de la sclérose en plaques.

I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire**
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

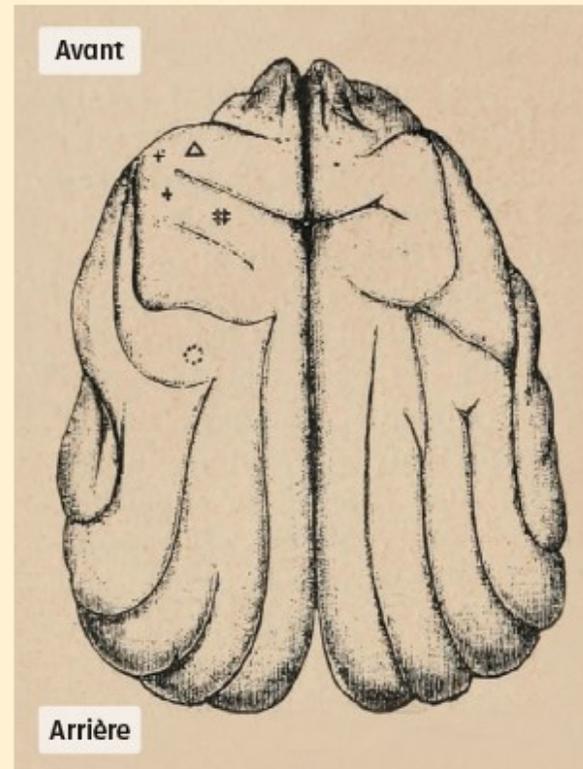
II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

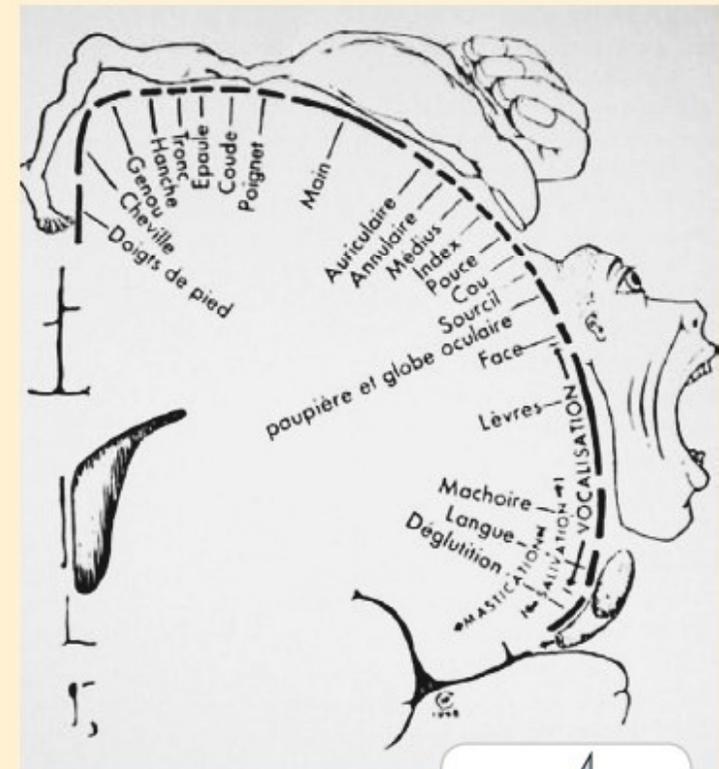
Découverte des aires motrices

En 1870, Hitzig et Fritsch stimulent, à l'aide de microélectrodes, le cortex d'un chien (la partie périphérique du cerveau). Ils constatent que la stimulation d'une zone précise, la « bande motrice », provoque des mouvements involontaires de l'animal.

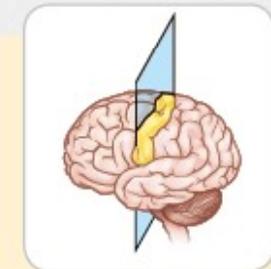
En 1950, Penfield cartographie précisément ce cortex moteur, en associant à chaque zone corticale la partie du corps dont elle contrôle le mouvement. Cette représentation schématique est appelée « *homonculus* de Penfield » ou homoncule moteur.



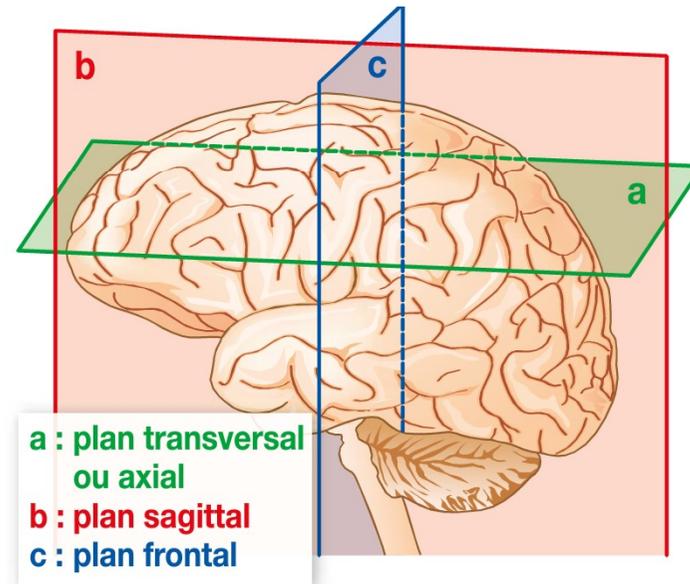
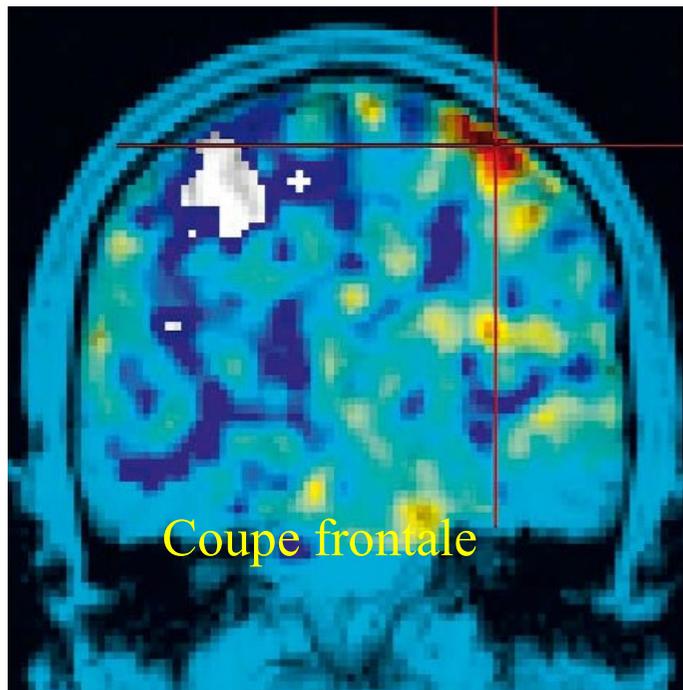
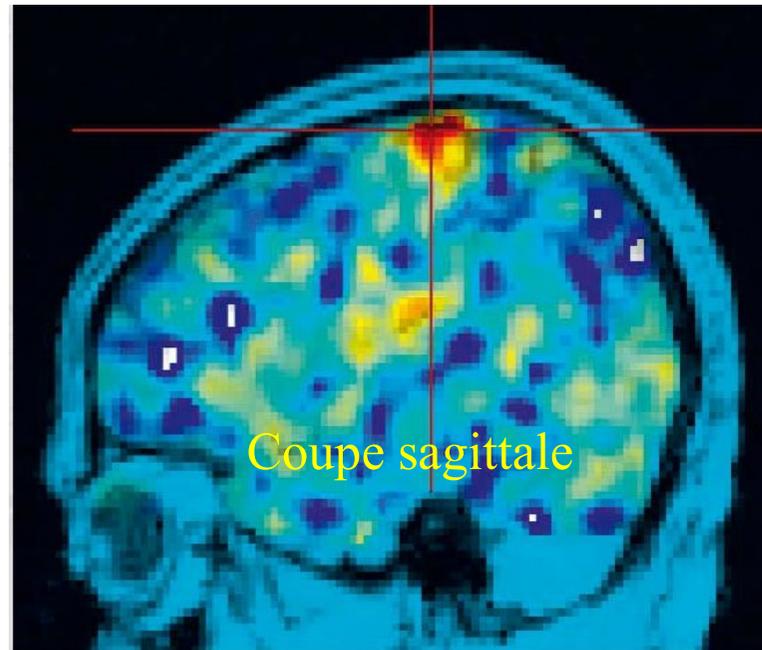
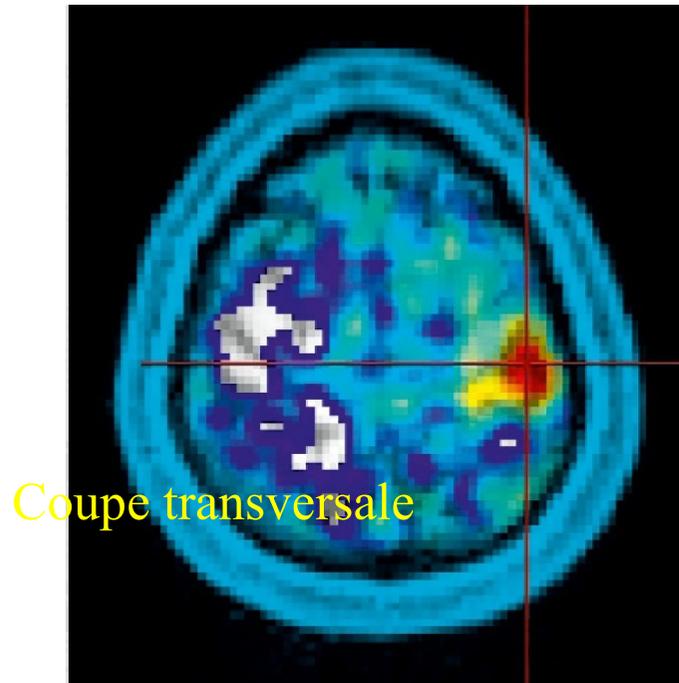
▲ Représentation schématique du cortex d'un chien (Hitzig et Fritsch). Les différents symboles représentent des points qui, lorsqu'ils sont électriquement stimulés, déclenchent des mouvements chez le chien.



▲ Homonculus de Penfield (coupe sagittale dans le cortex moteur).

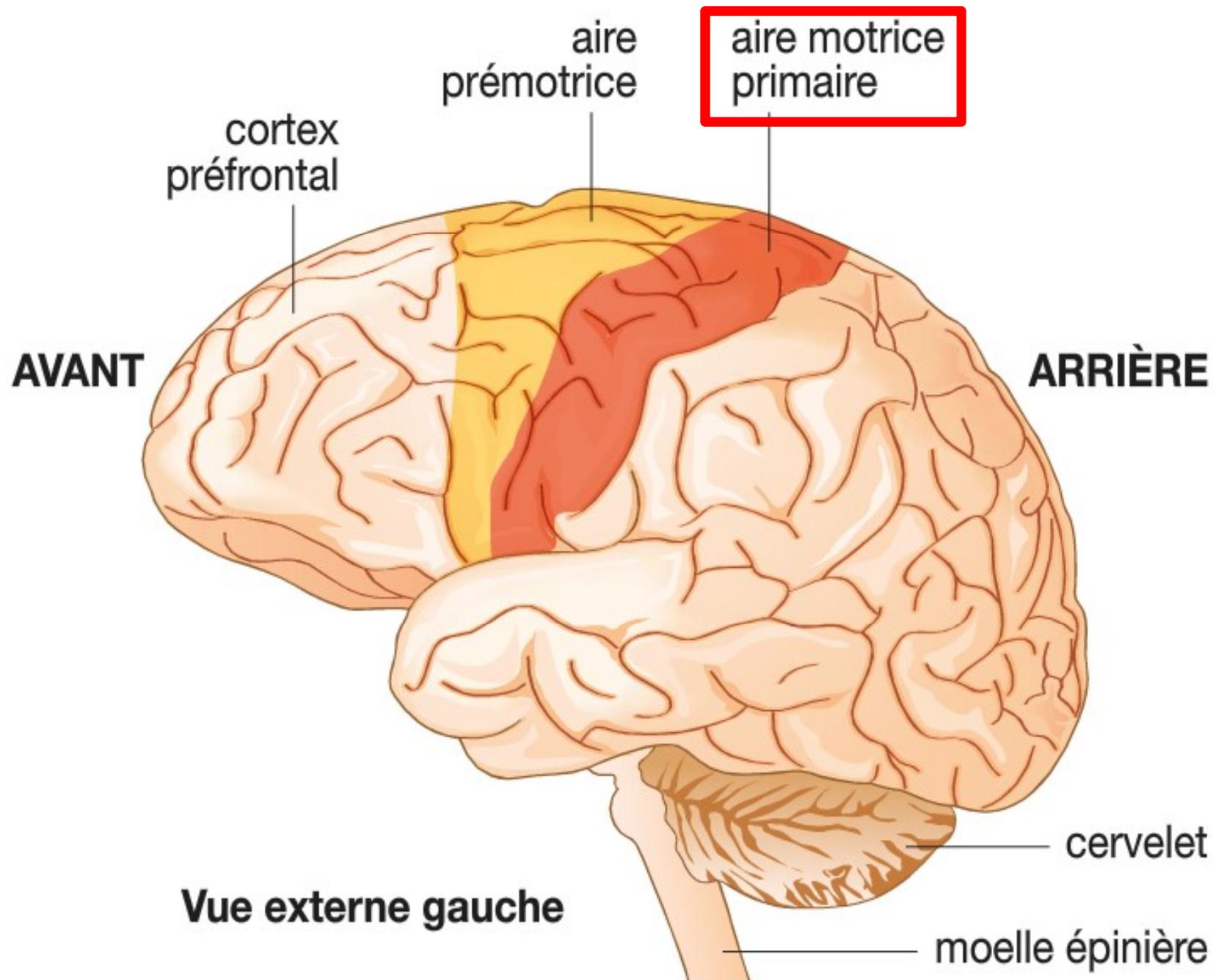


Localisation des aires motrices



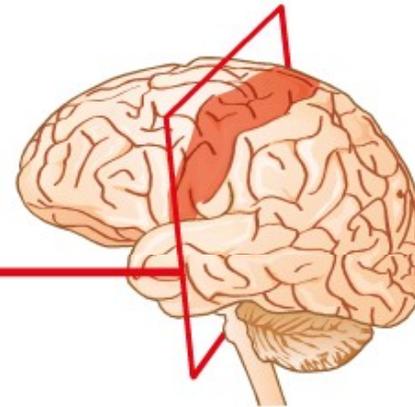
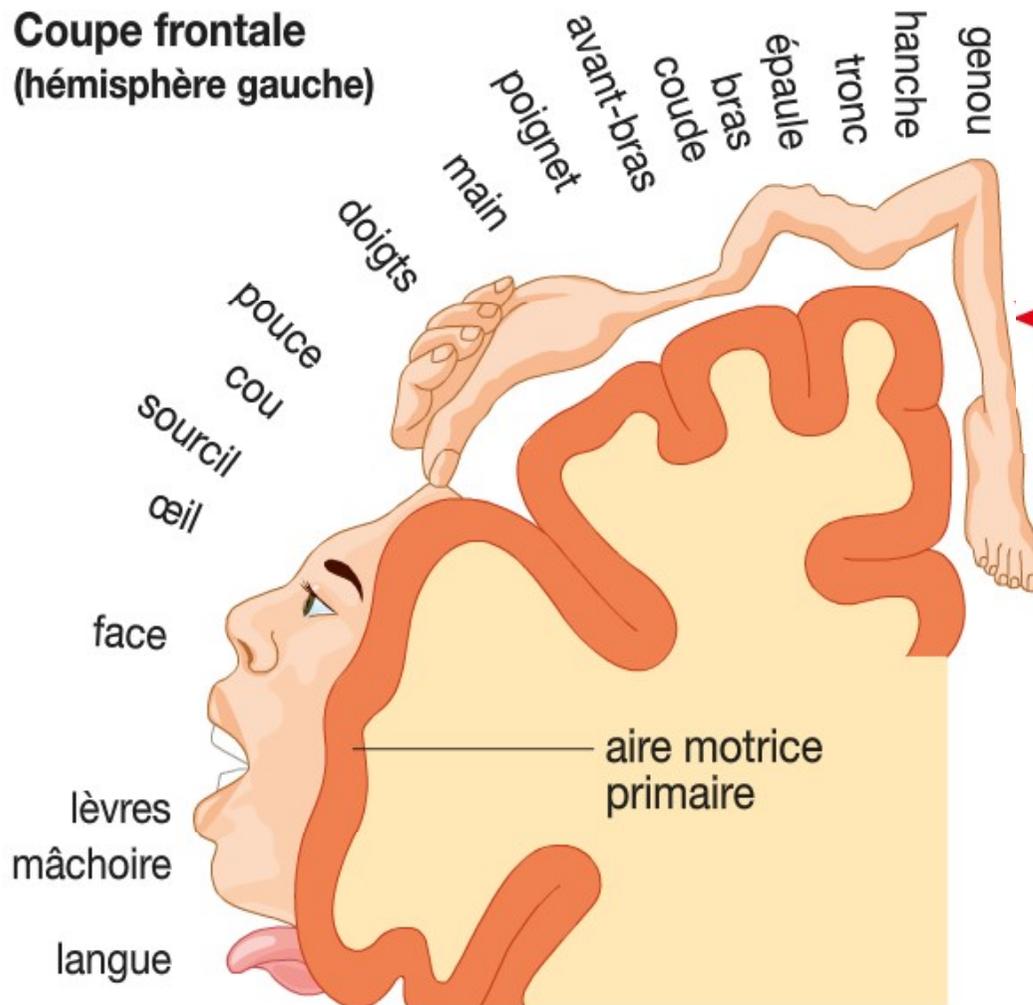
On a demandé au sujet d'effectuer des clics de souris de la main gauche

Aires corticales impliquées dans la commande des mouvements volontaires

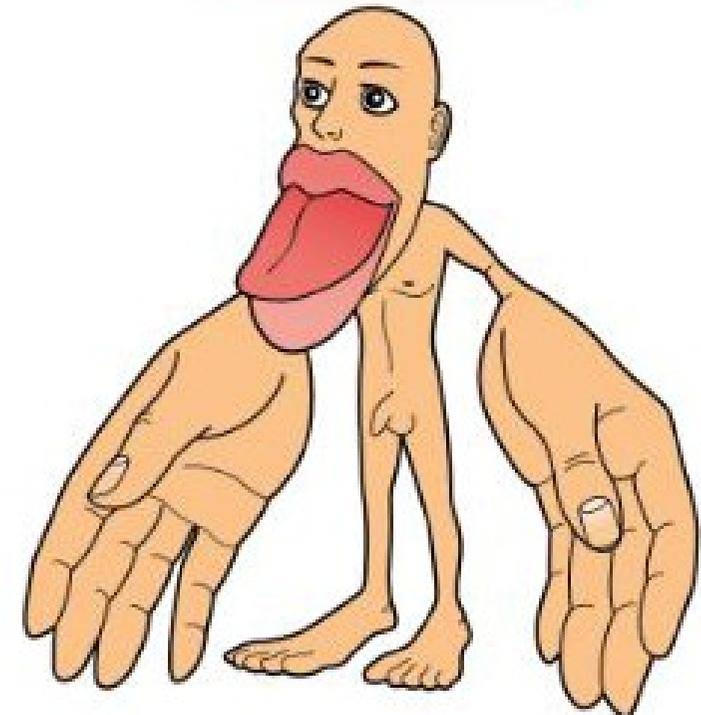


Cartographie de l'aire motrice primaire

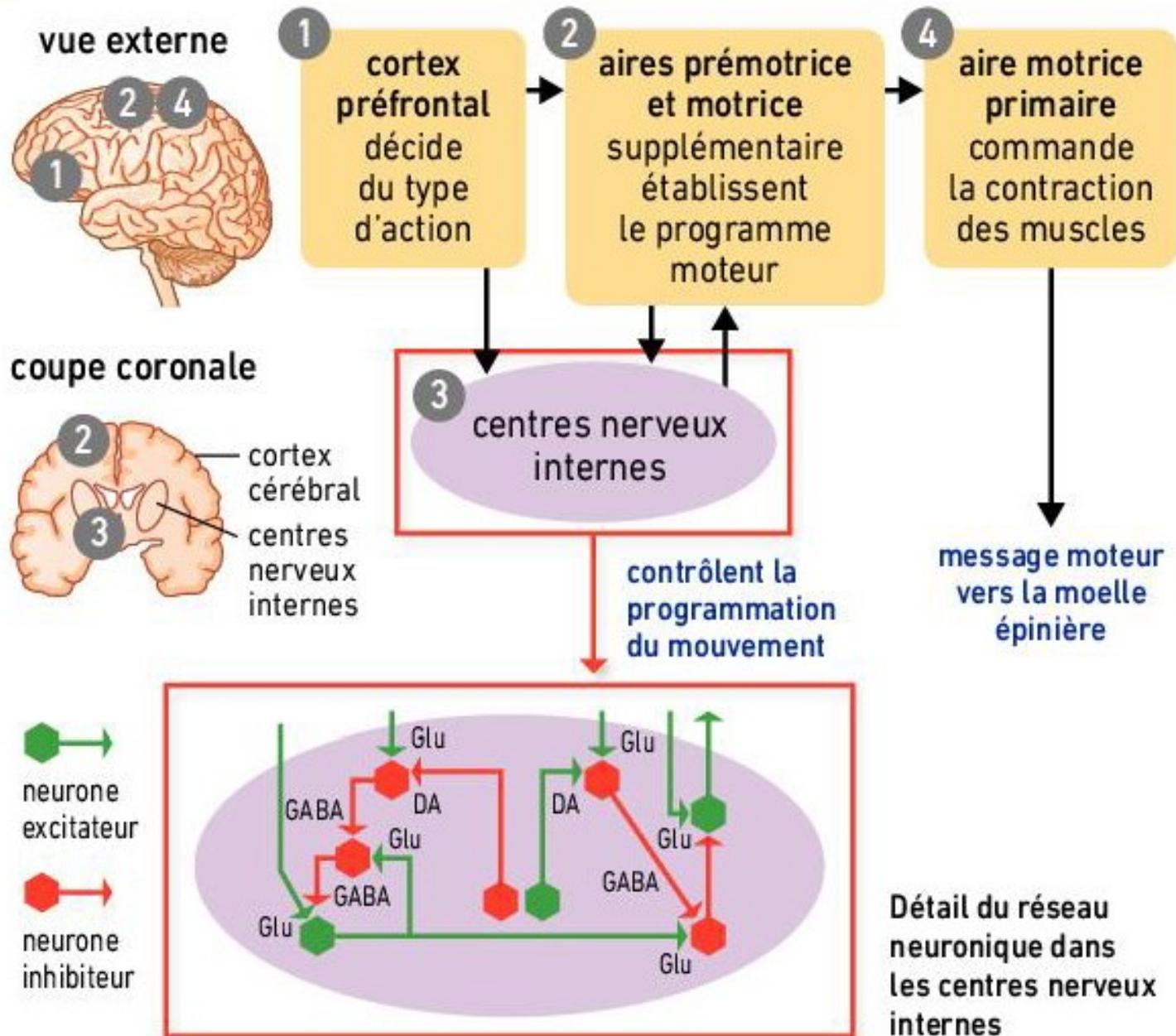
Coupe frontale
(hémisphère gauche)



Homonculus moteur

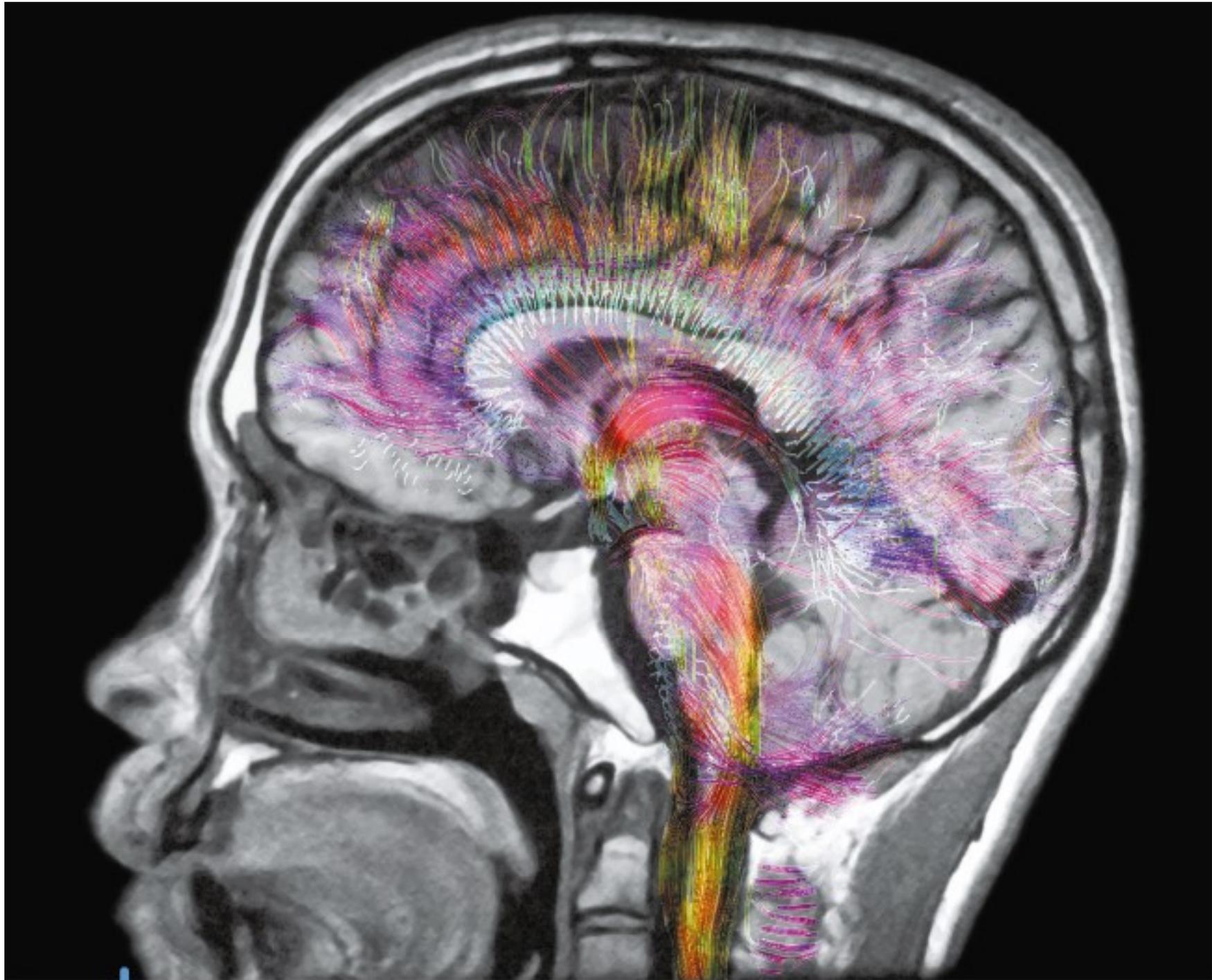


Coopération entre différentes aires cérébrales



■ Réseau neuronique impliqué dans le contrôle du mouvement.

Coopération entre différentes aires cérébrales



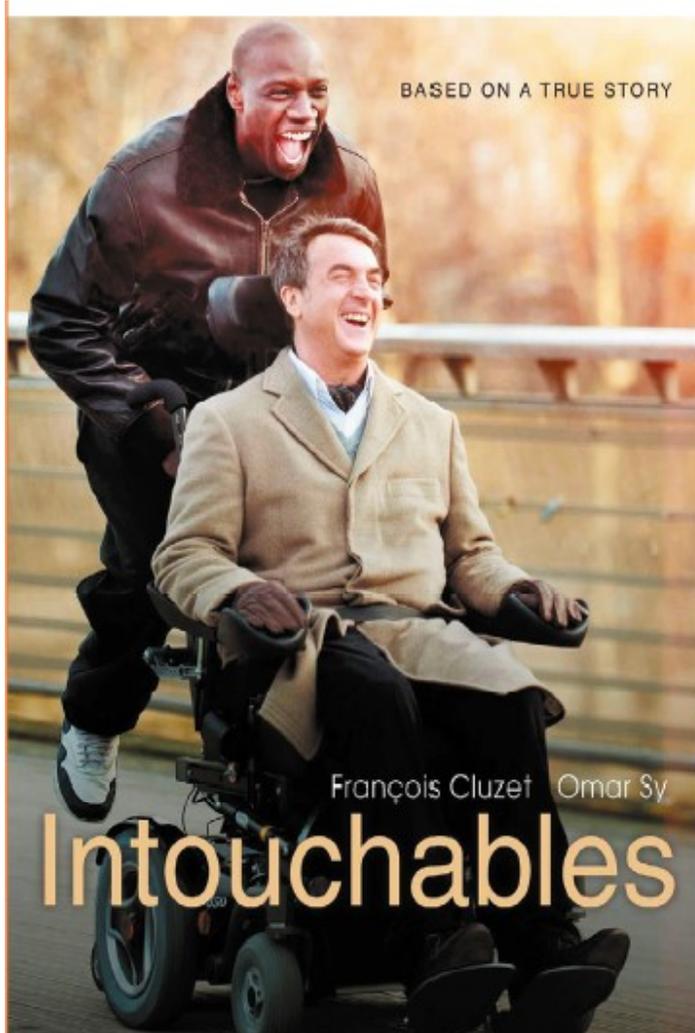
I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices**
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

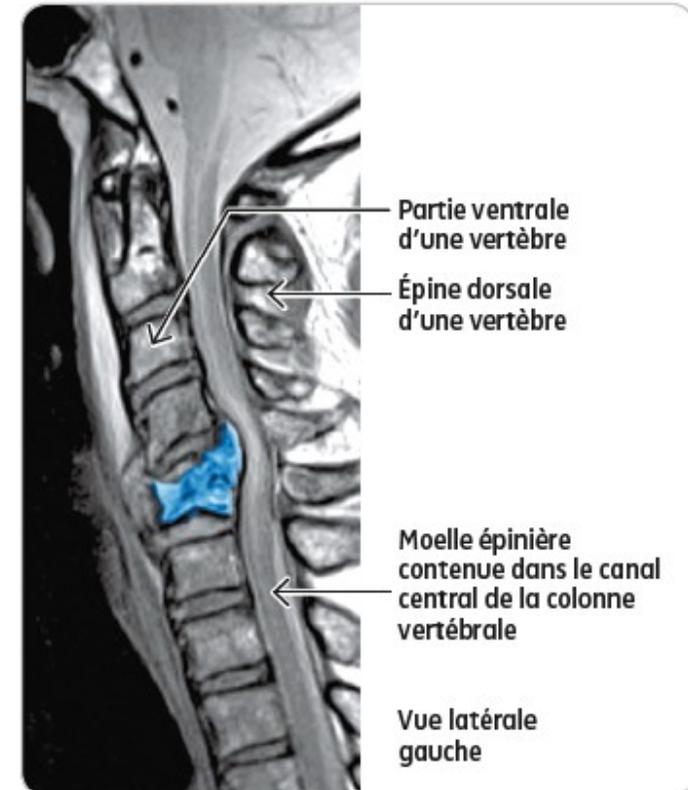
II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Fracture d'une vertèbre cervicale



- 1** Affiche du film *Intouchables*. François Cluzet y joue le rôle d'un homme devenu tétraplégique (paralysé des quatre membres et du tronc) suite à un accident de parapente ayant provoqué une lésion de la moelle épinière.

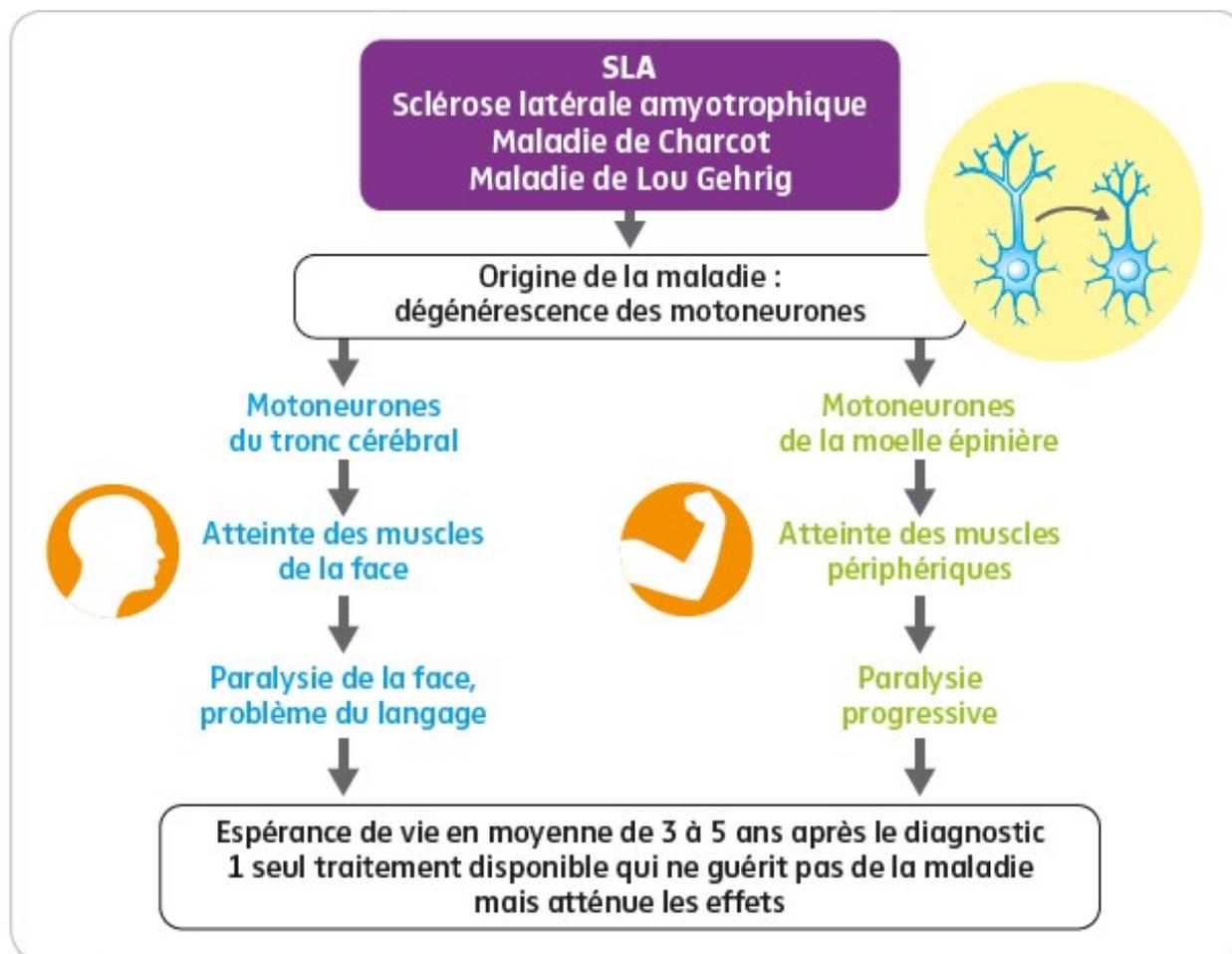


- 2** IRM de la colonne vertébrale d'un patient montrant la fracture d'une vertèbre cervicale (en bleu). Ce type de lésion est susceptible d'entraîner une tétraplégie.

Sclérose latérale amyotrophique

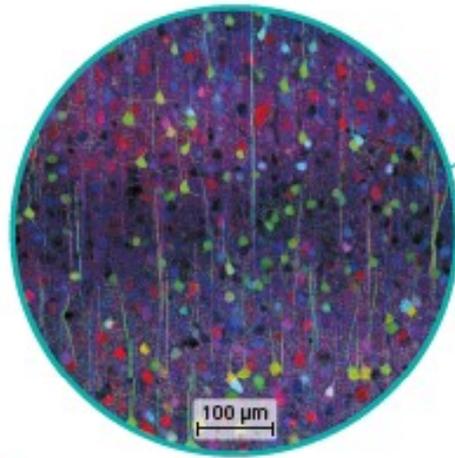


3 Le célèbre astrophysicien Stephen Hawking fait une apparition dans la série télévisée *The Big Bang Theory*. Notamment connu pour ses travaux sur les trous noirs, Stephen Hawking est décédé en 2018 d'une sclérose latérale amyotrophique.

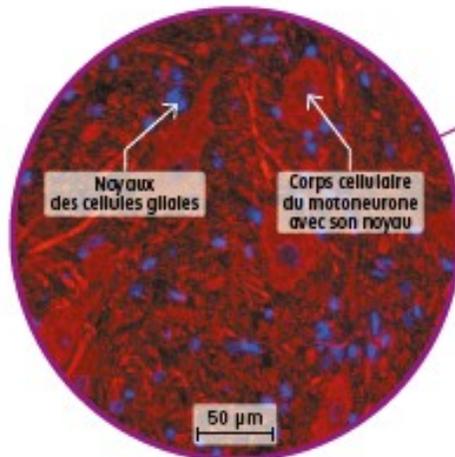


4 Comprendre la sclérose latérale amyotrophique (SLA). Les neurones pyramidaux du cortex cérébral sont également touchés par la dégénérescence.

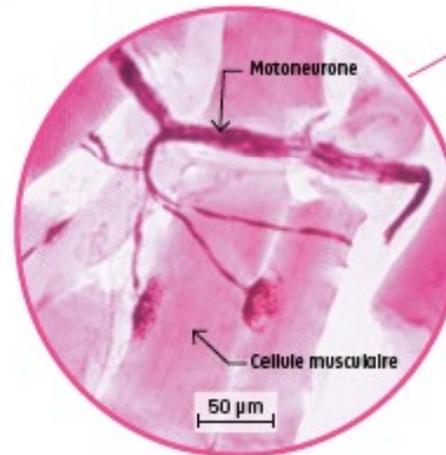
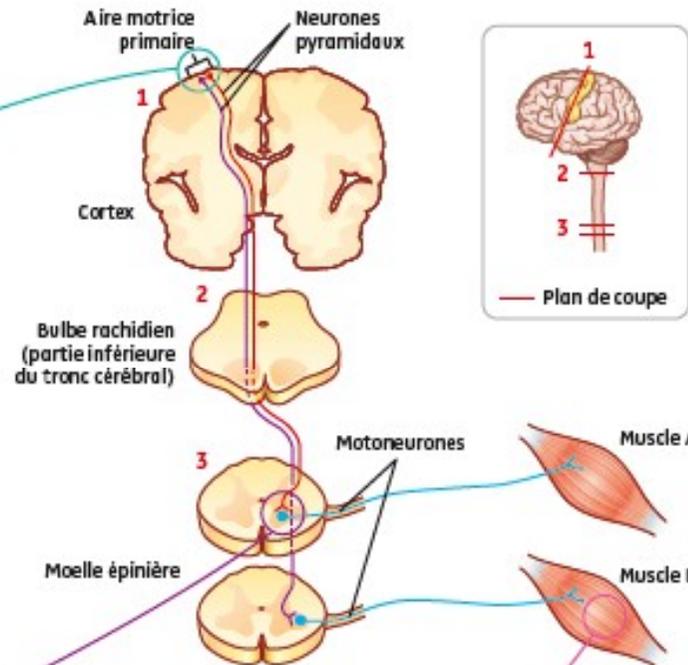
Voies motrices



A Cellules nerveuses du cortex moteur (dont les neurones pyramidaux). Observation en microscopie à fluorescence, technique du Brainbow (technique qui utilise des souris génétiquement modifiées afin de colorer aléatoirement les neurones de leur cortex).



B Motoneurones de la moelle épinière. Observation en microscopie à fluorescence : les corps cellulaires, dendrites et axones apparaissent en rouge, les noyaux en bleu.



C Plaquette motrice. Observation microscopique. Un motoneurone se ramifie et peut commander plusieurs cellules musculaires d'un même muscle. En revanche, une cellule musculaire ne reçoit des informations que d'un seul motoneurone.

5 Les voies motrices (schéma général et photographies d'observations microscopiques). Les corps cellulaires des neurones pyramidaux sont situés dans le cortex moteur. Leurs axones cheminent dans la moelle épinière et établissent des connexions synaptiques avec les motoneurones commandant les différents muscles de l'organisme.

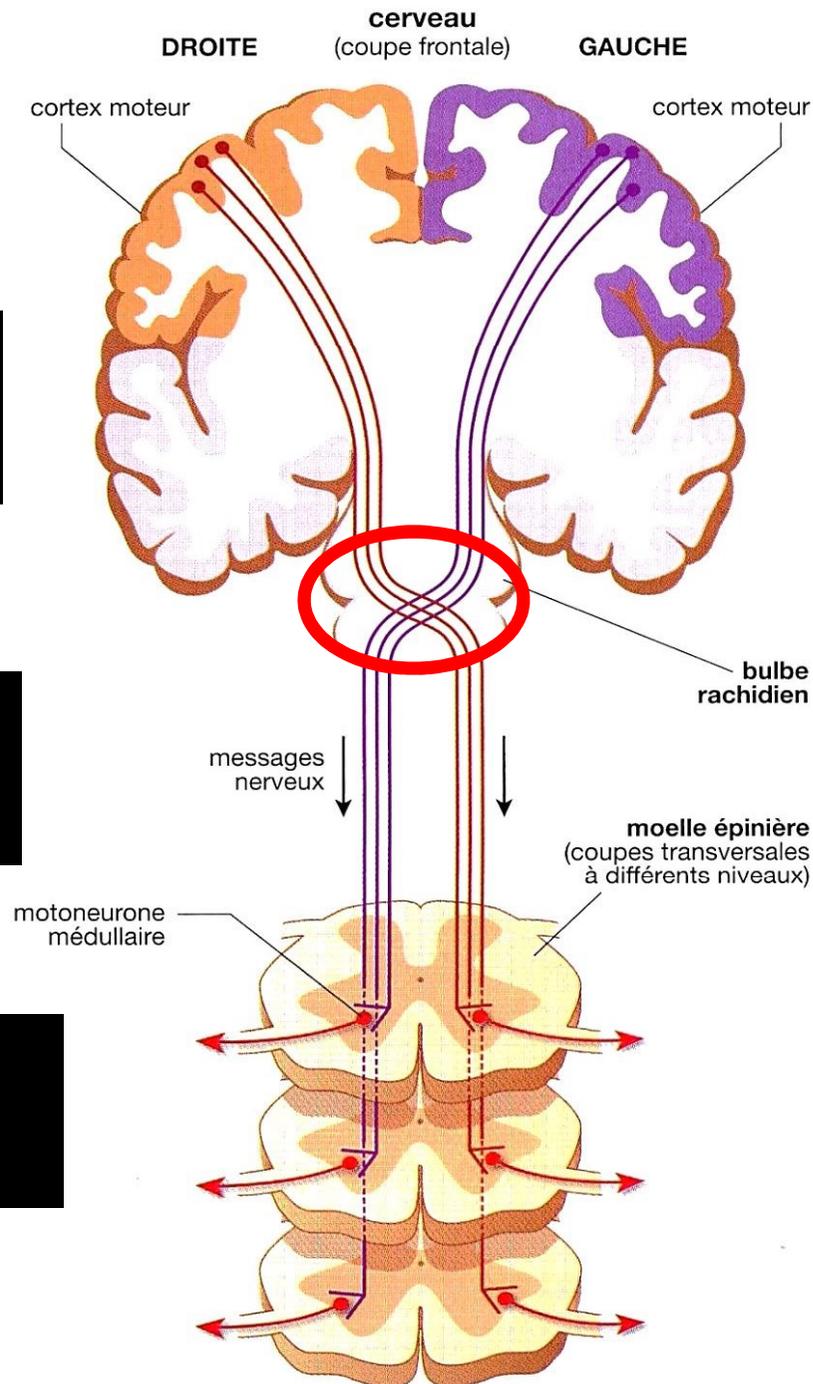
Les voies motrices de la commande volontaire

Cortex moteur

**Substance blanche
de l'encéphale**

**Substance blanche
de la ME**

**Motoneurones
médullaires**



Bulbe rachidien

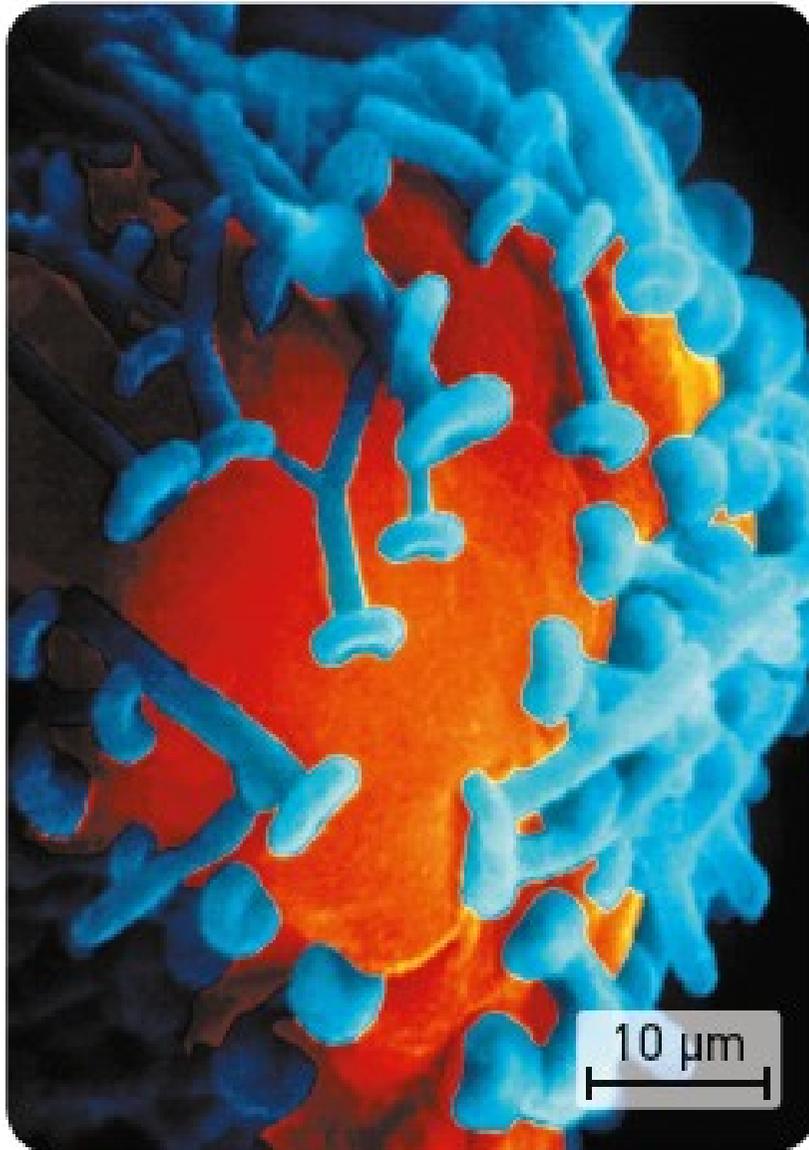
I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires**

II. La plasticité cérébrale

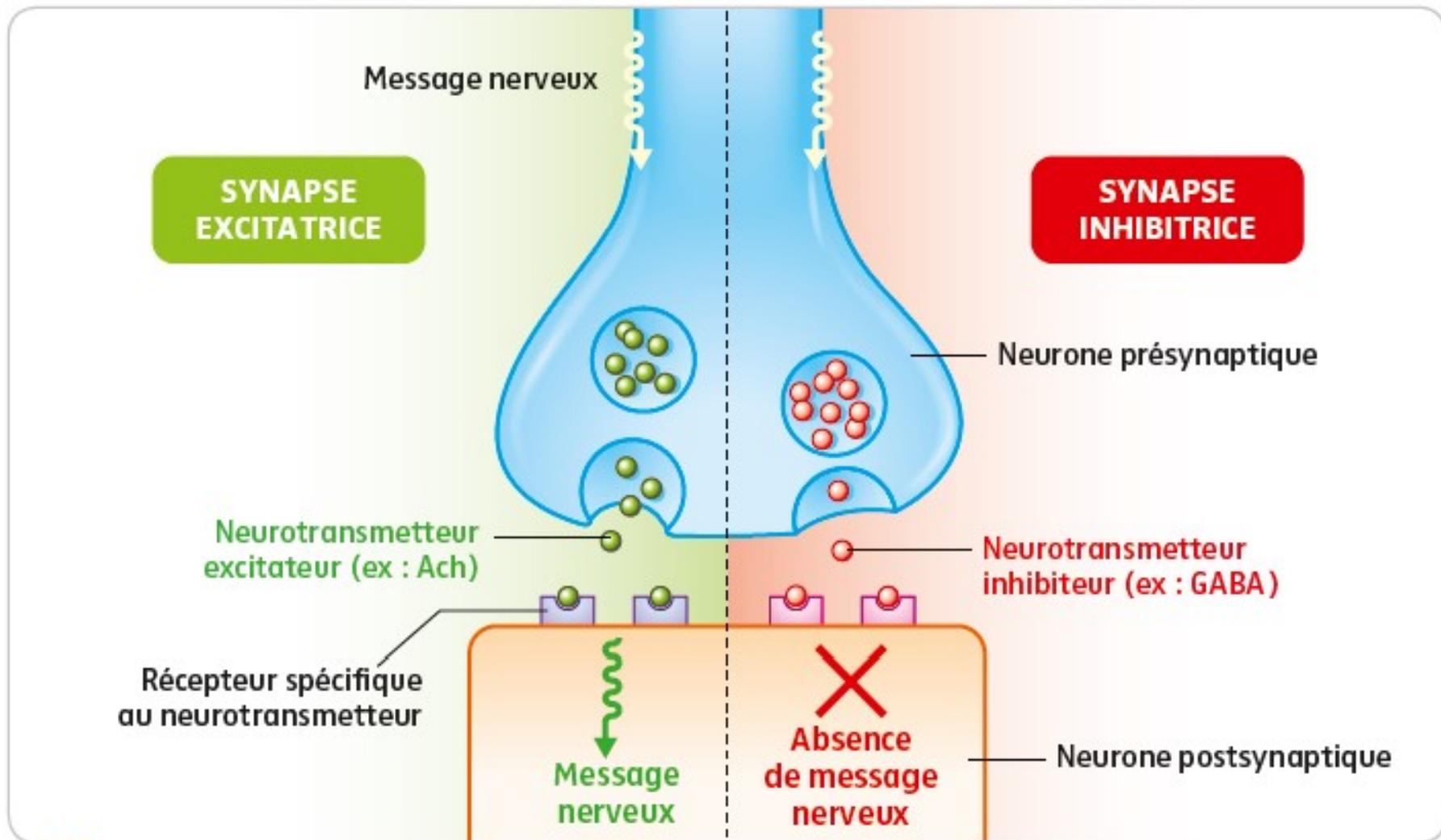
- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Un corps cellulaire reçoit de nombreuses connexions synaptiques



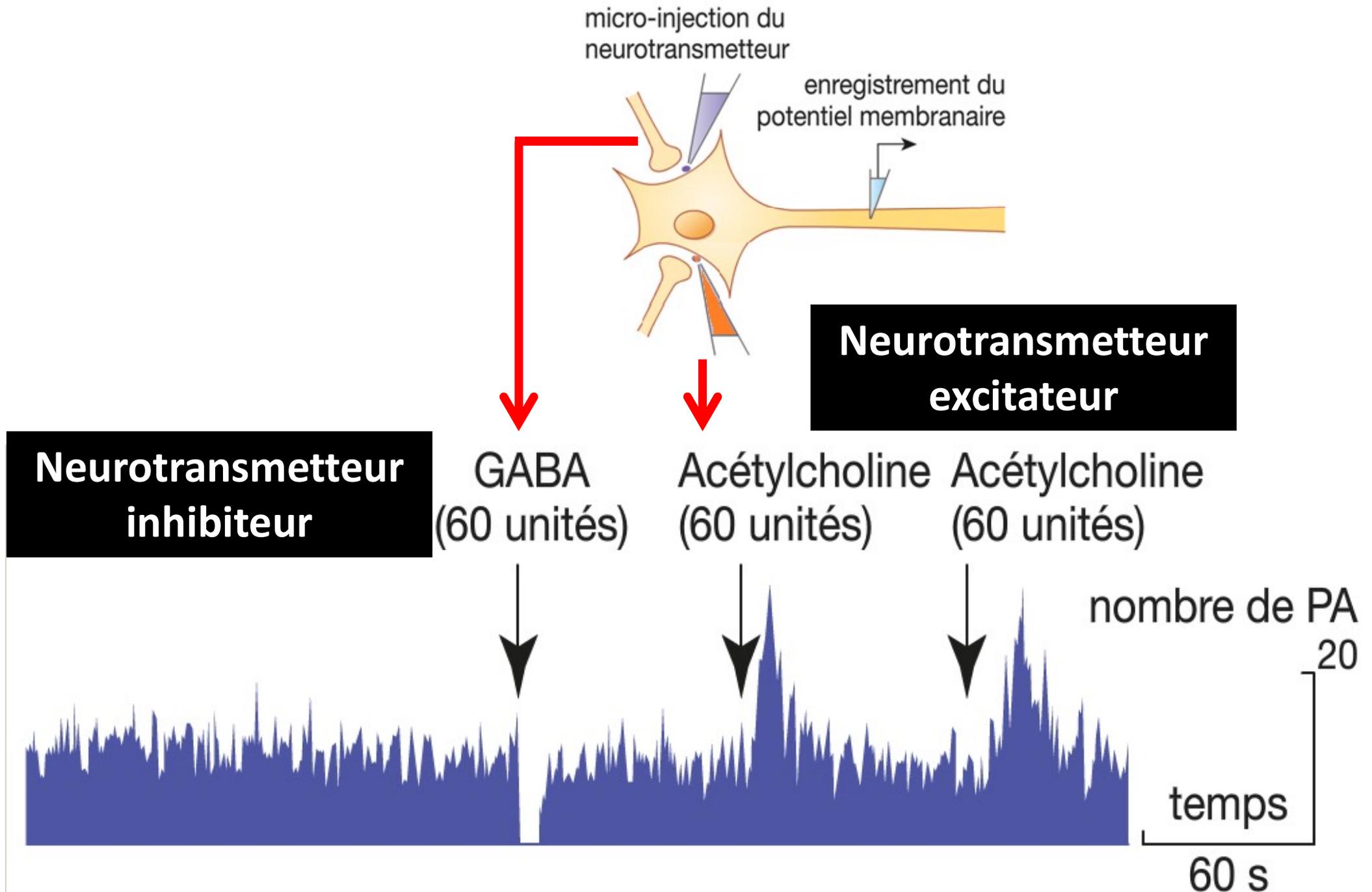
- 2 Corps cellulaire d'un motoneurone (en orange) recevant de nombreuses connexions synaptiques provenant d'autres neurones (en bleu).

Synapse excitatrice ou inhibitrice

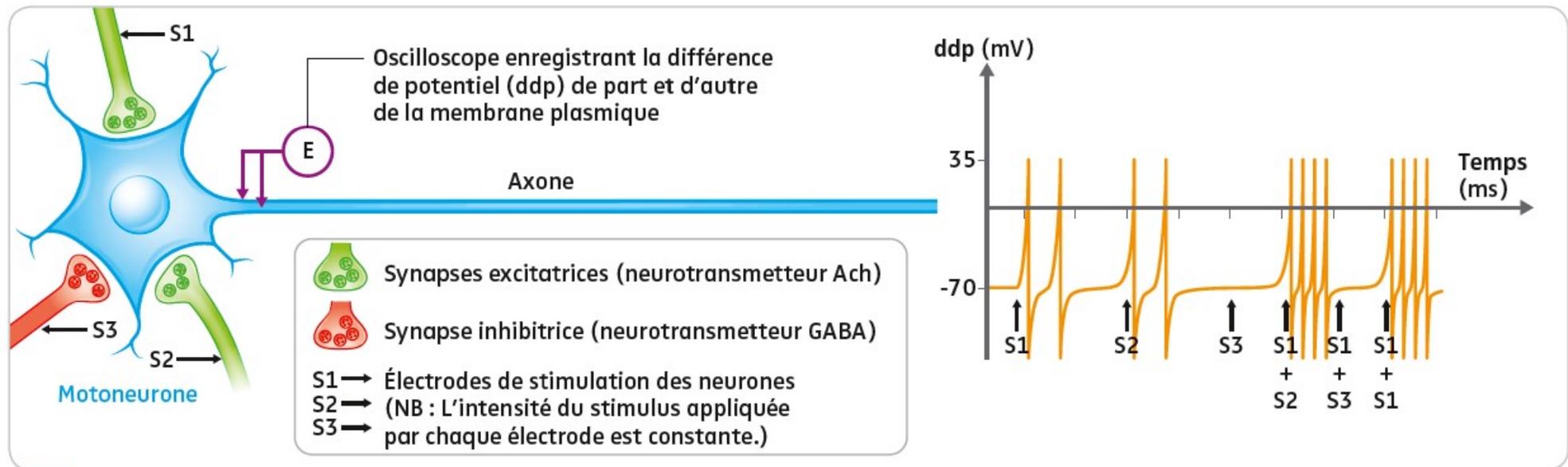


- 1 Synapses excitatrices et inhibitrices.** Toutes les synapses fonctionnent de la même manière mais, selon la nature du neurotransmetteur libéré, la synapse peut être excitatrice ou inhibitrice.

Synapse excitatrice ou inhibitrice



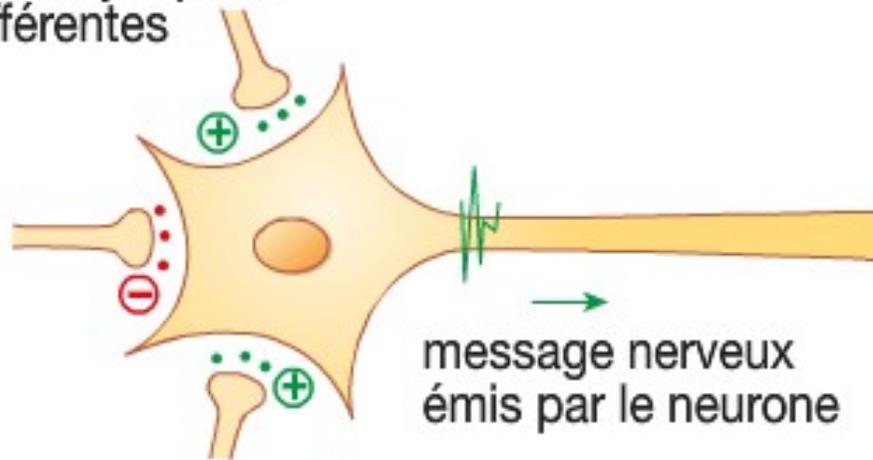
L'intégration des informations par le corps cellulaire



3 Expérience de stimulations d'un corps cellulaire de motoneurone et enregistrement des messages nerveux en résultant dans l'axone de ce motoneurone.

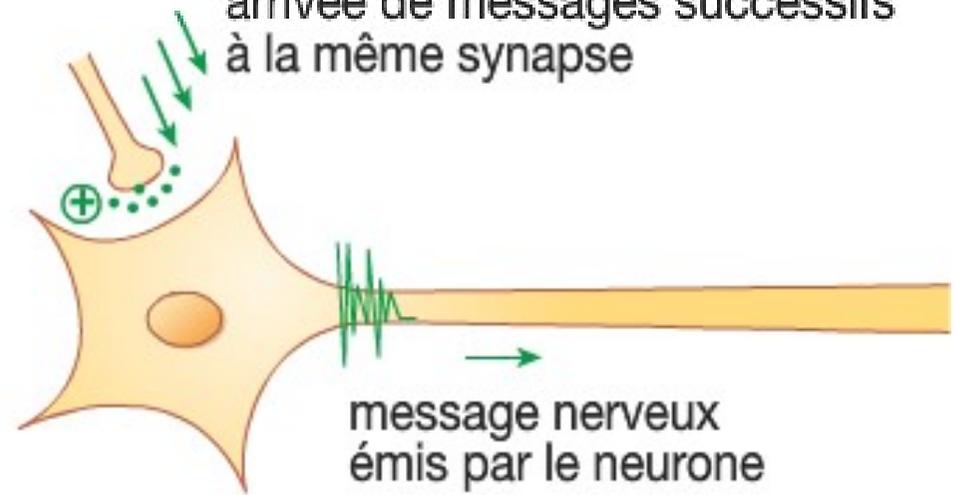
Sommation spatiale et temporelle

arrivée simultanée de messages
à des synapses
différentes



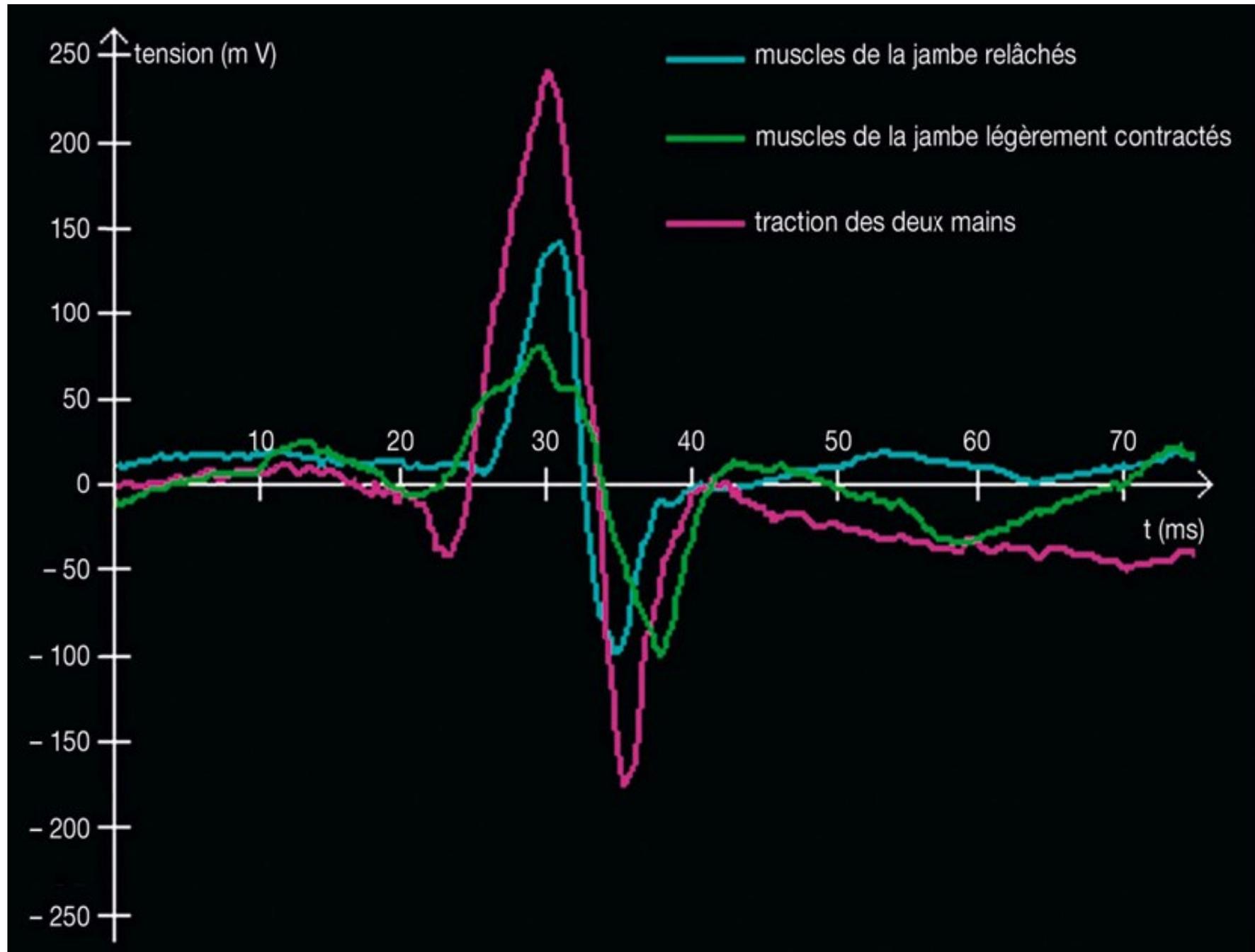
Sommation spatiale

arrivée de messages successifs
à la même synapse

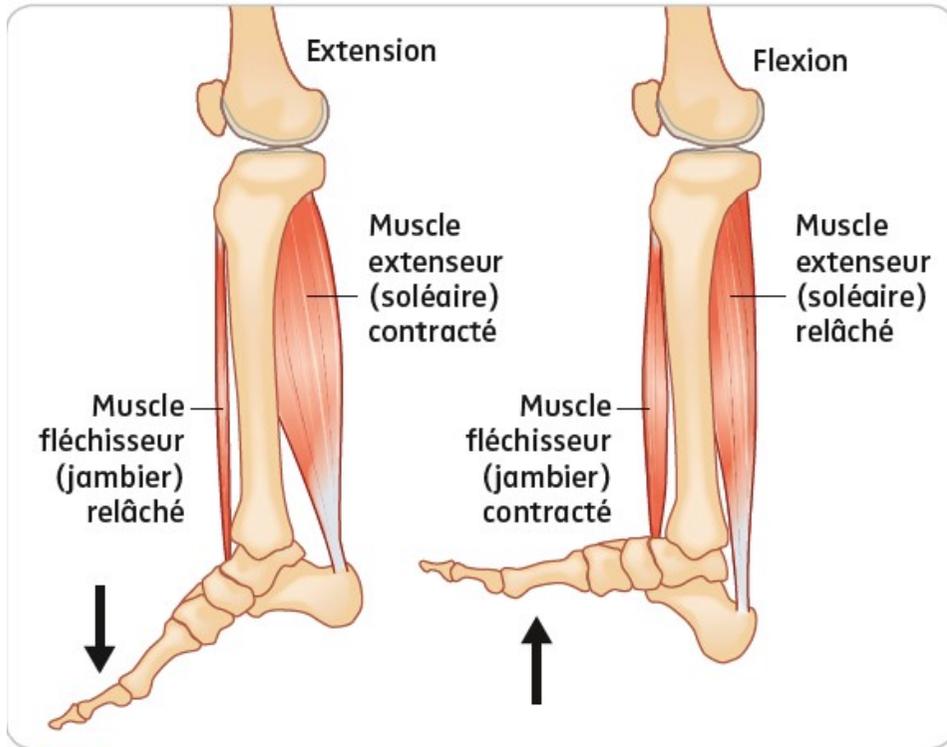


Sommation temporelle

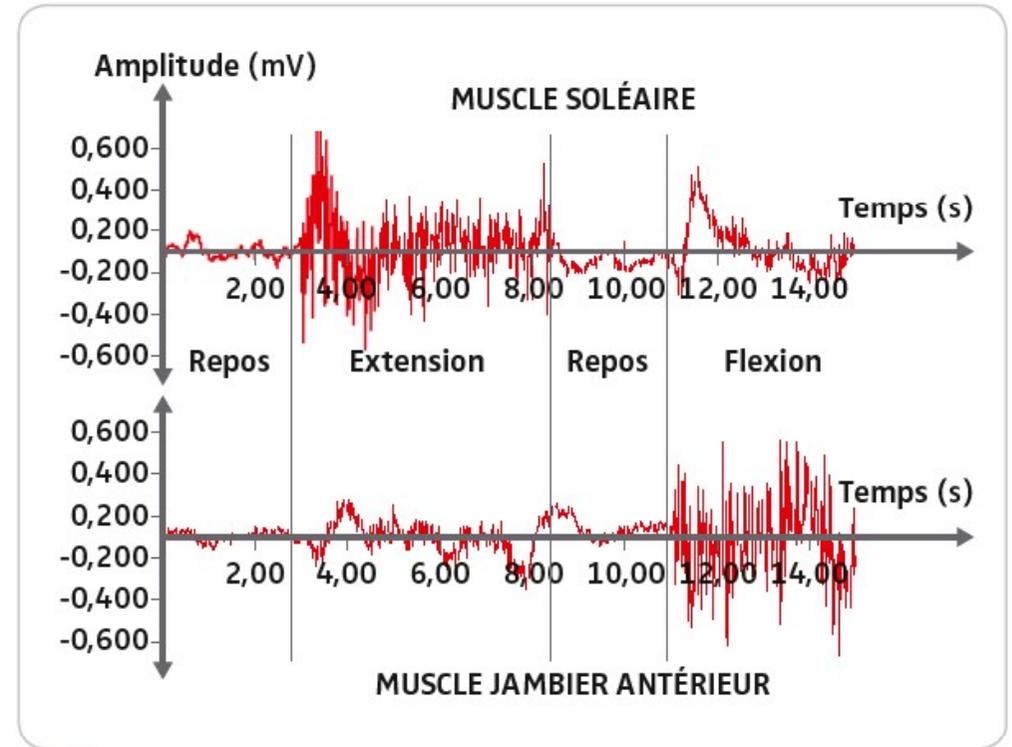
L'inhibition du réflexe myotatique



L'inhibition du réflexe myotatique

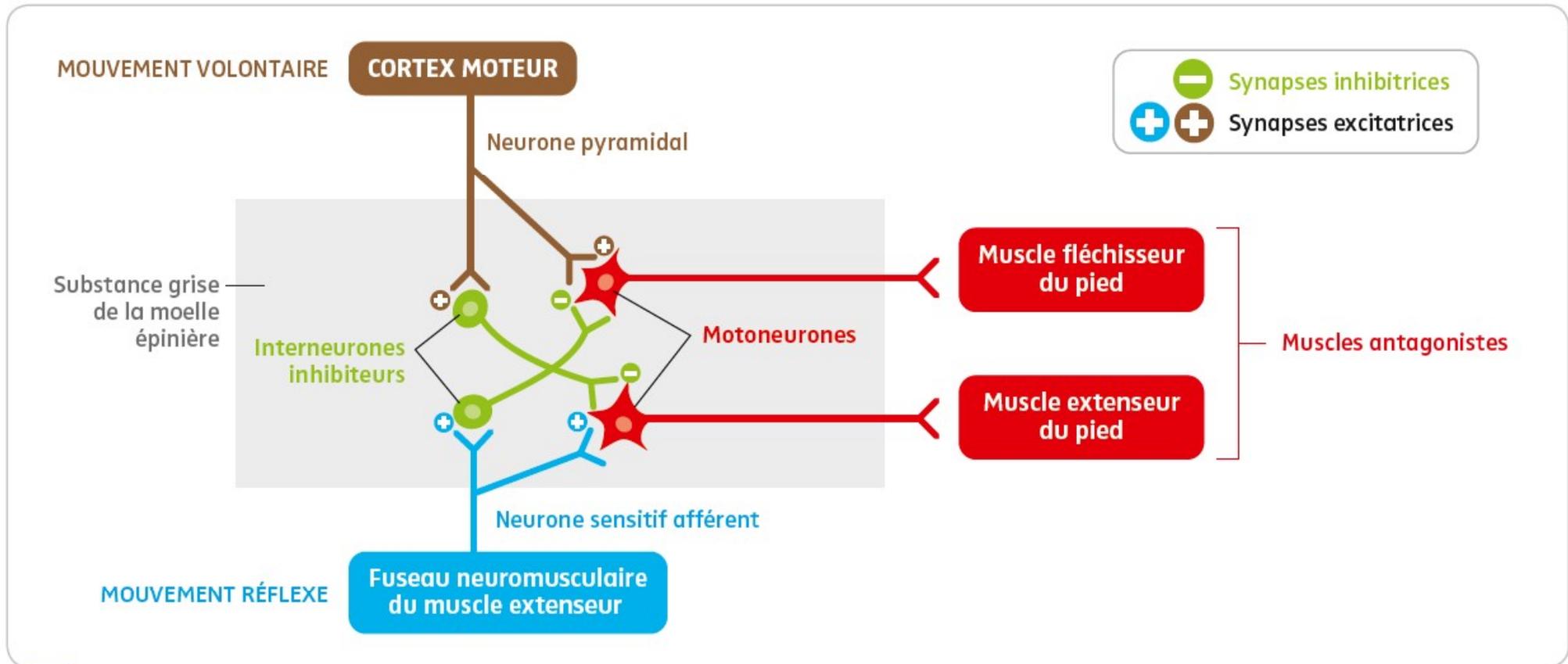


4 Schéma d'extension et de flexion du pied.
Le soléaire et le jambier sont deux muscles antagonistes (ils ont une action contraire).



5 Électromyogrammes (EMG) de deux muscles antagonistes enregistrés simultanément au cours de mouvements d'extension puis de flexion du pied.

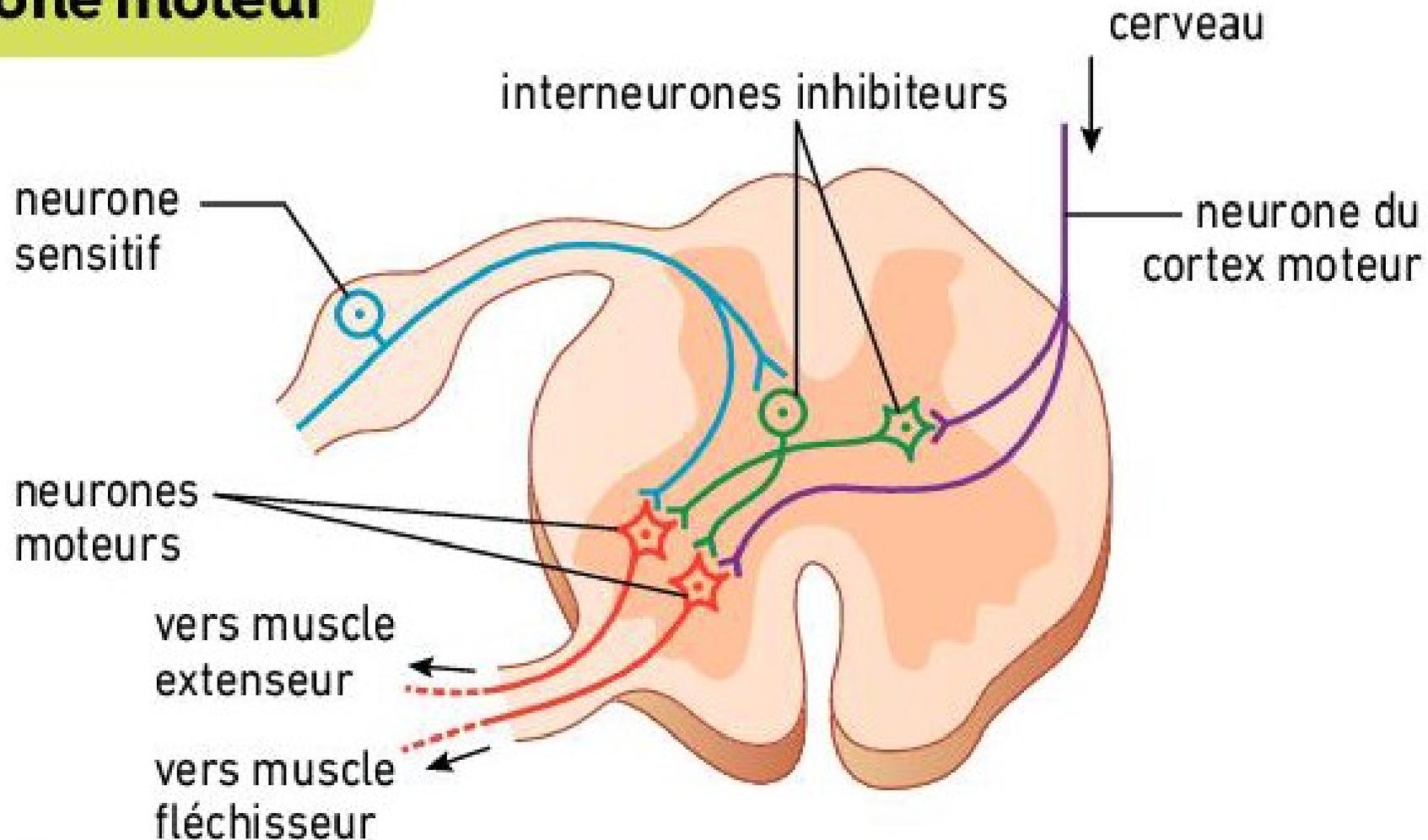
L'inhibition du réflexe myotatique



6 Circuit neuronal simplifié d'inhibition réciproque des muscles antagonistes.

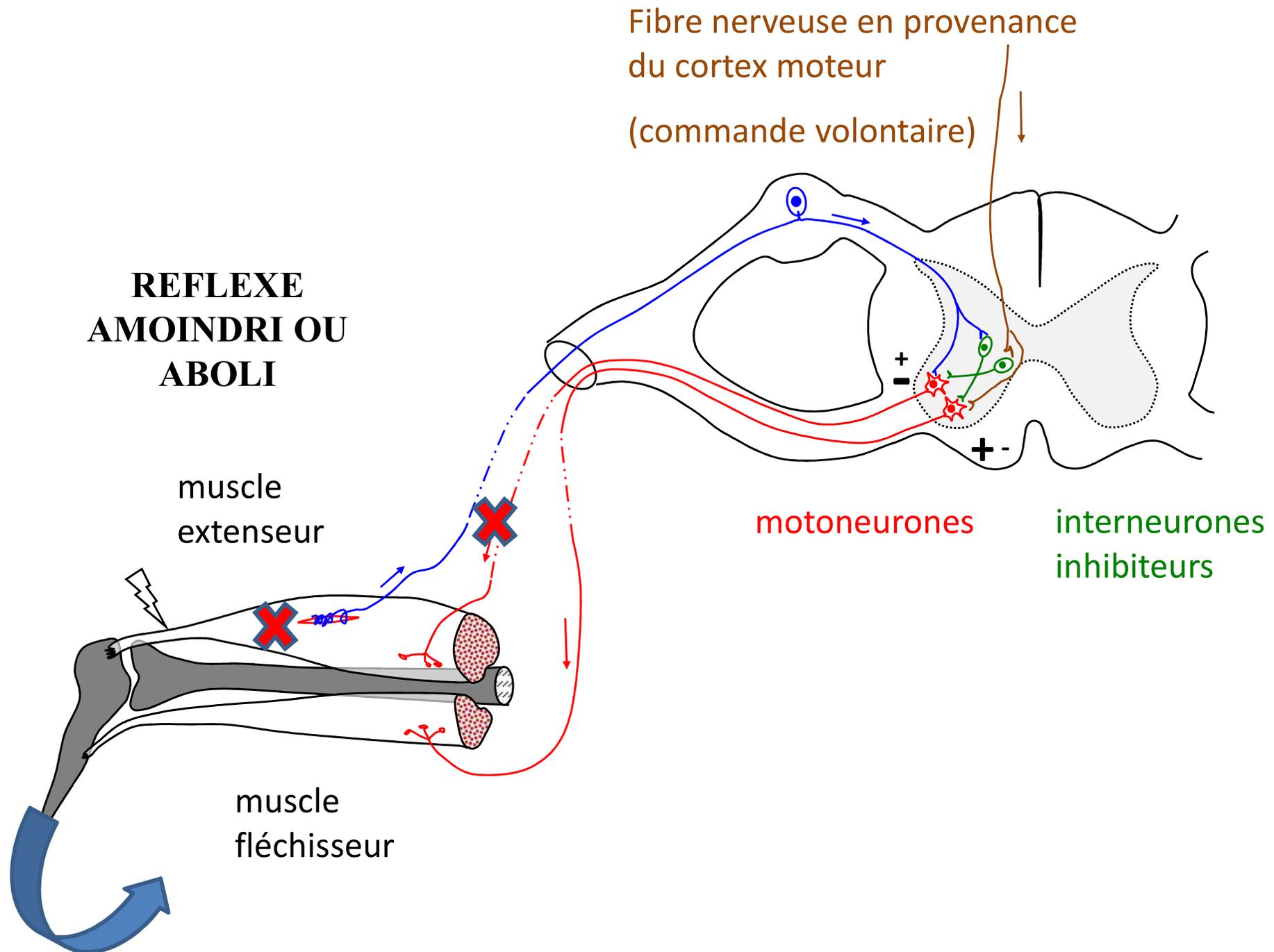
L'inhibition du réflexe myotatique

motoneurone



- A** Exemples de diverses connexions synaptiques sur un même motoneurone.

Intervention de la commande volontaire



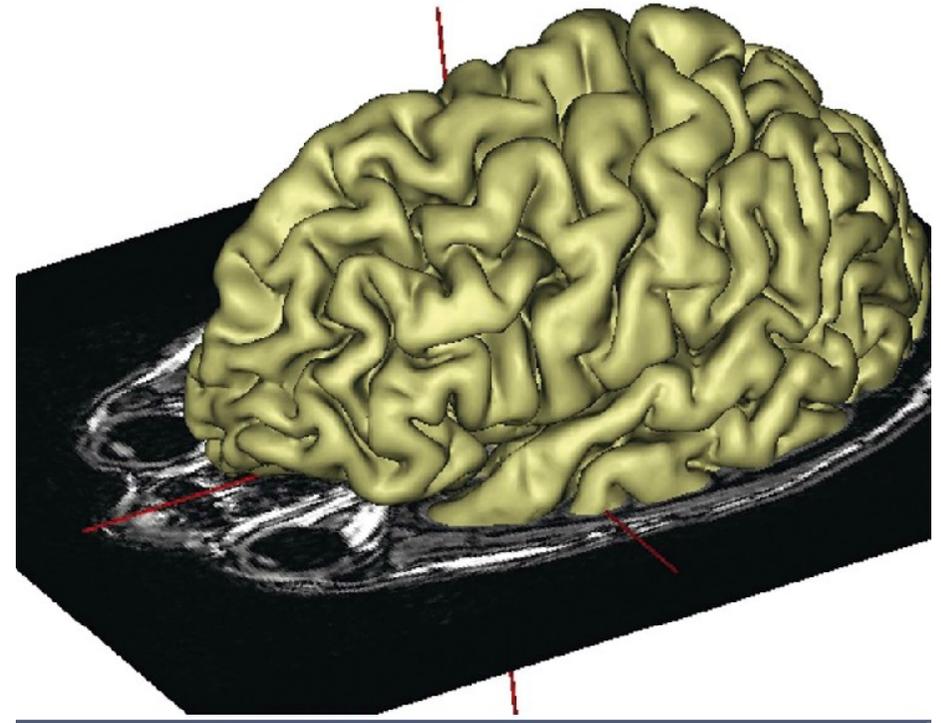
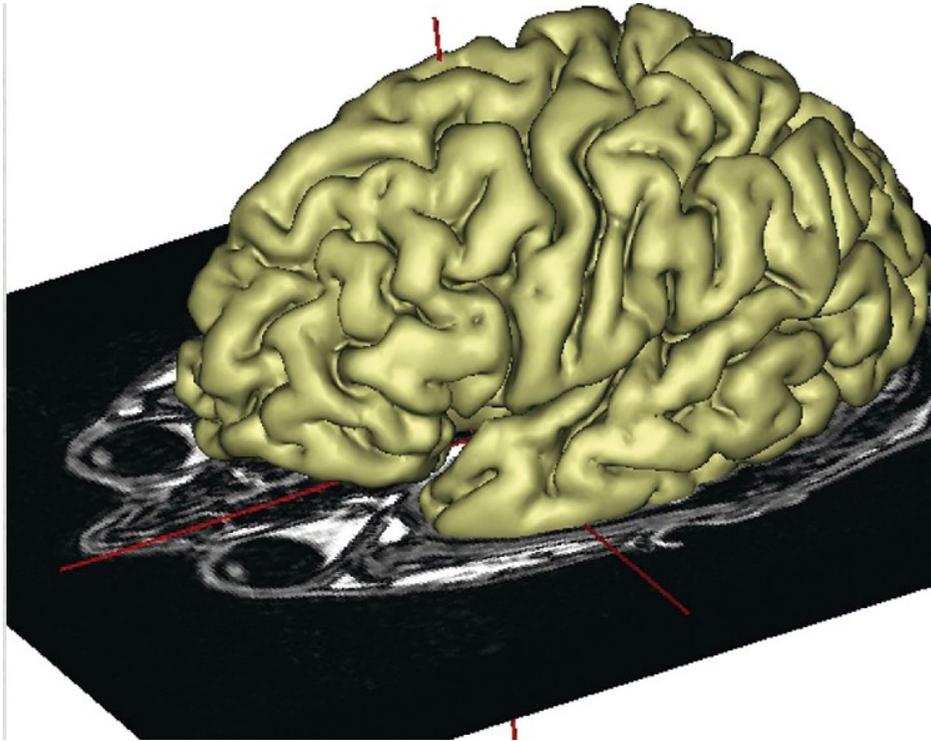
I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.**
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Variations interindividuelles



Variations interindividuelles

Les images **IRMf** ci-contre ont été obtenues en suivant exactement le même protocole que celui présenté page 3.

■ DÉMARCHÉ

- Charger l'ir
- Sélectionner de bien mettre plus actives.
- Faire varier sentant l'activ
- Déplacer la les trois imag
- Recommen xième sujet.

■ EXEMPLE DE RÉSULTAT

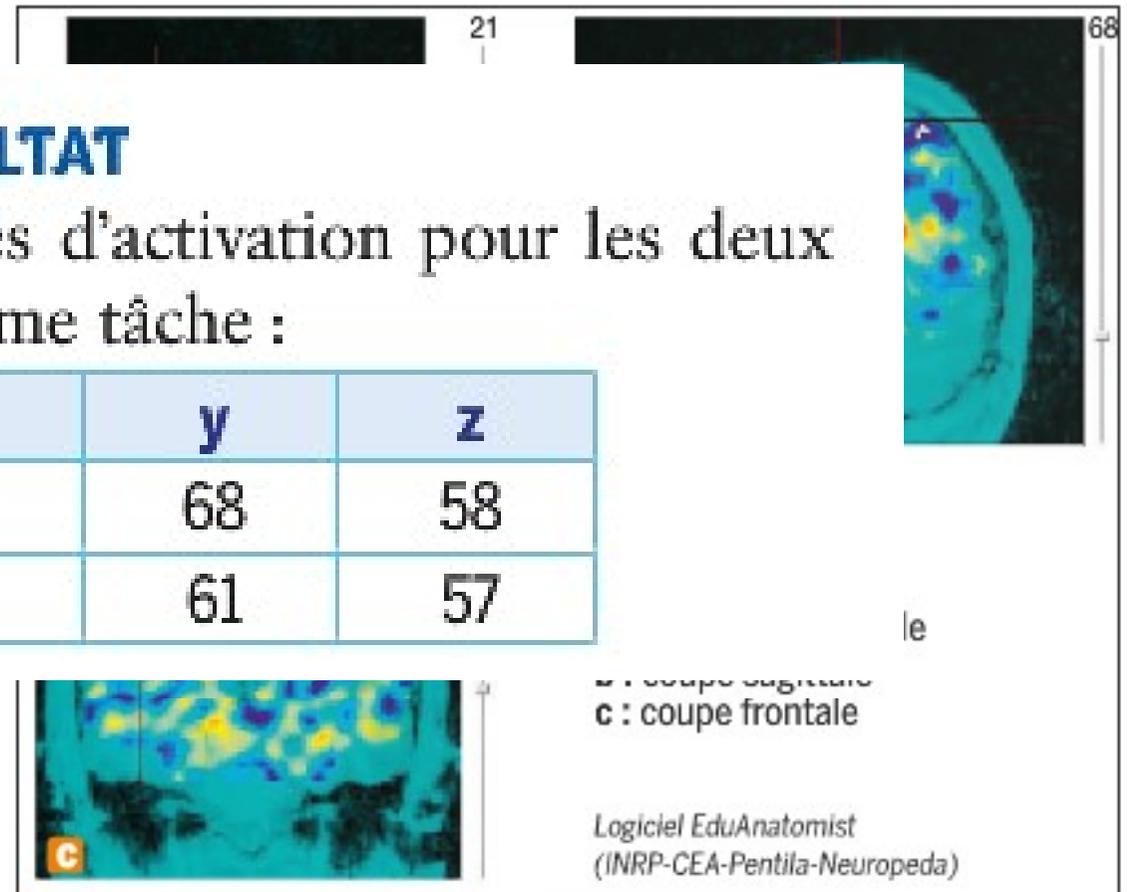
Localisation des images d'activation pour les deux sujets effectuant la même tâche :

	x	y	z
Sujet 1	21	68	58
Sujet 2	23	61	57

■ EXEMPLE DE RÉSULTAT

Localisation des images d'activation pour les deux sujets effectuant la même tâche :

	x	y	z
Sujet 1	21	68	58
Sujet 2	23	61	57

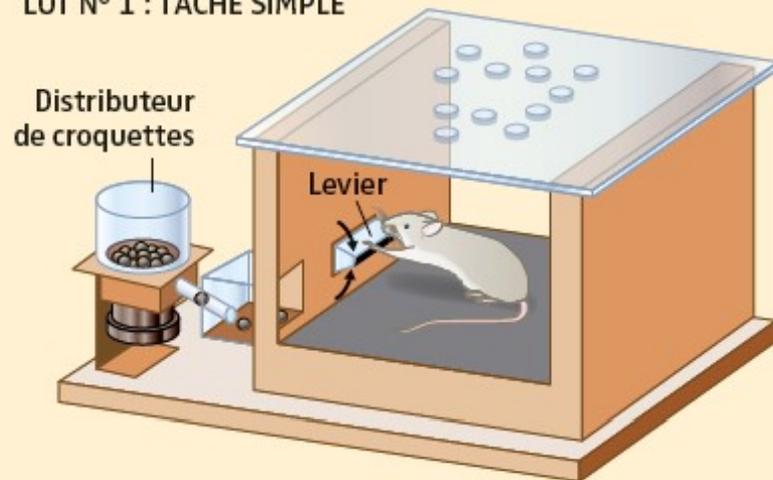


Images correspondant au sujet 1.

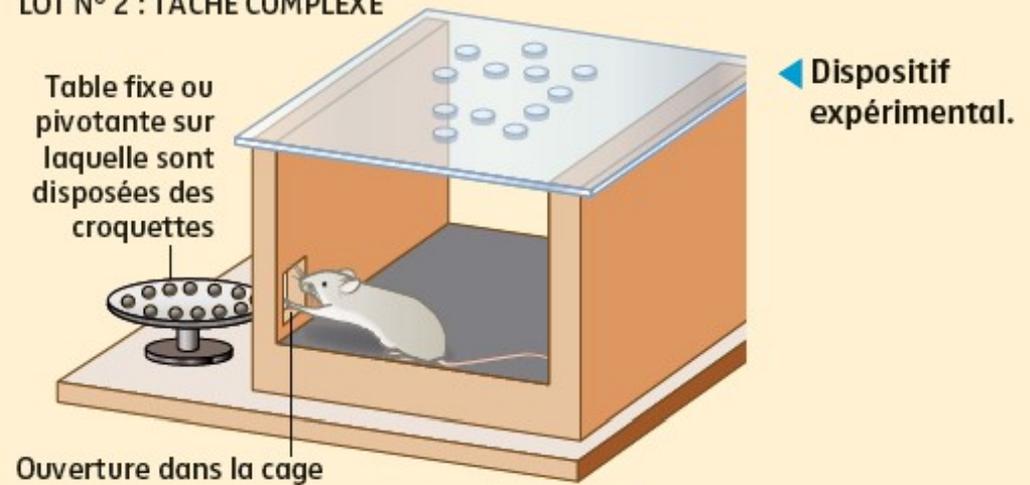
Effet de l'entraînement

Huit rats sont répartis en deux lots. Le lot n°1 est entraîné pendant 10 jours à une tâche simple : il obtient des croquettes en pressant simplement un levier. Le lot n° 2 est entraîné à une tâche complexe : il doit récupérer les croquettes sur une table située à l'extérieur de la cage, en passant la patte par une petite ouverture. Cette table est fixe pendant les 5 premiers jours de l'expérience, puis tournante pendant les 5 derniers jours.

LOT N° 1 : TÂCHE SIMPLE

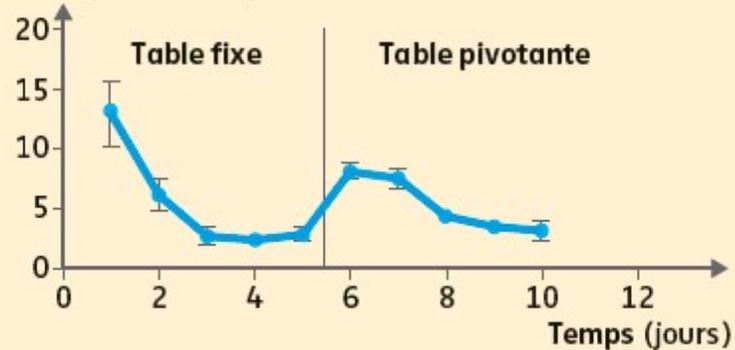


LOT N° 2 : TÂCHE COMPLEXE



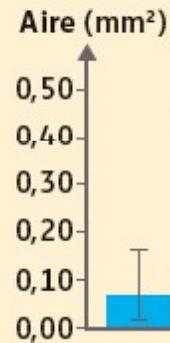
Effet de l'entraînement

Nombre de tentatives avant de réussir à attraper une croquette



▲ Évolution des performances des rats du lot n°2, au cours du temps.

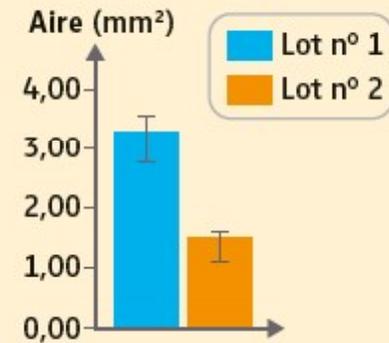
Doigts



Poignet



Coude et épaule



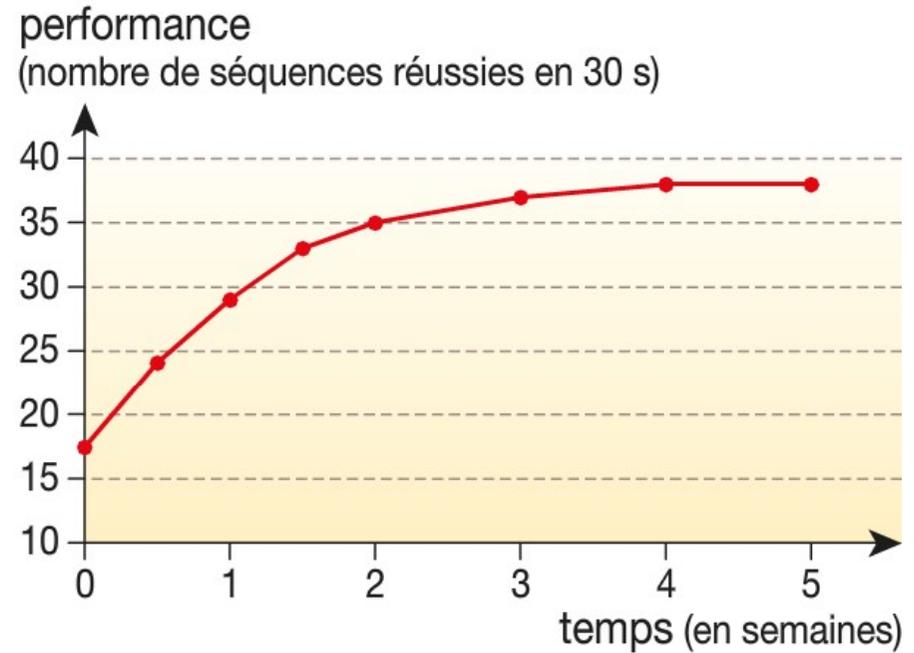
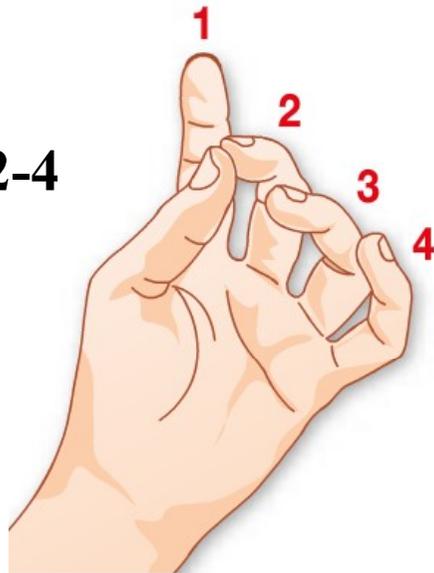
▲ Surface des zones dédiées au mouvement des doigts, du poignet ou du coude et de l'épaule dans le cortex moteur, pour chaque lot de rats.

3 Expériences de Kleim, Barbey et Nudo sur la plasticité du cortex moteur du rat.

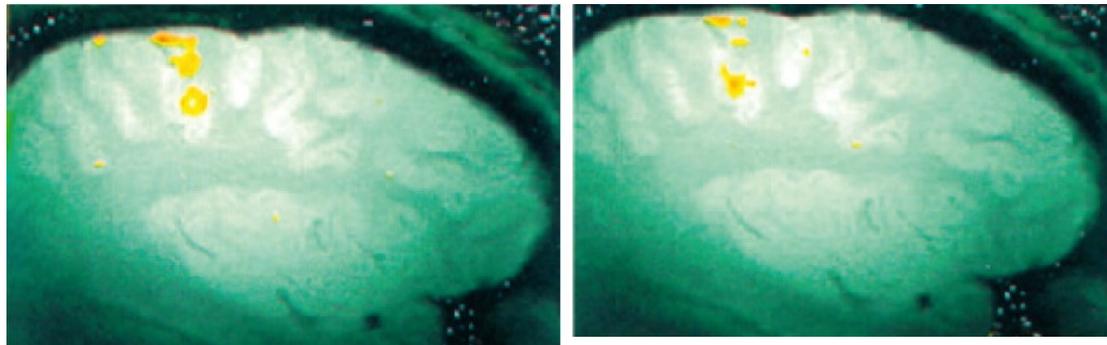
Les effets de l'entraînement mis ici en évidence sont également valables dans le cas d'exercices de rééducation mis en œuvre après une lésion.

Effet de l'entraînement

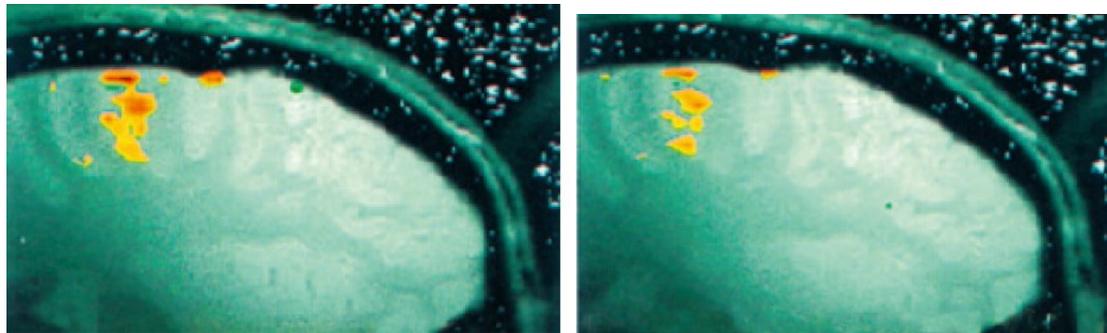
Séquence 4-1-3-2-4



Après 3 semaines
d'entraînement



3 semaines après
arrêt de
l'entraînement

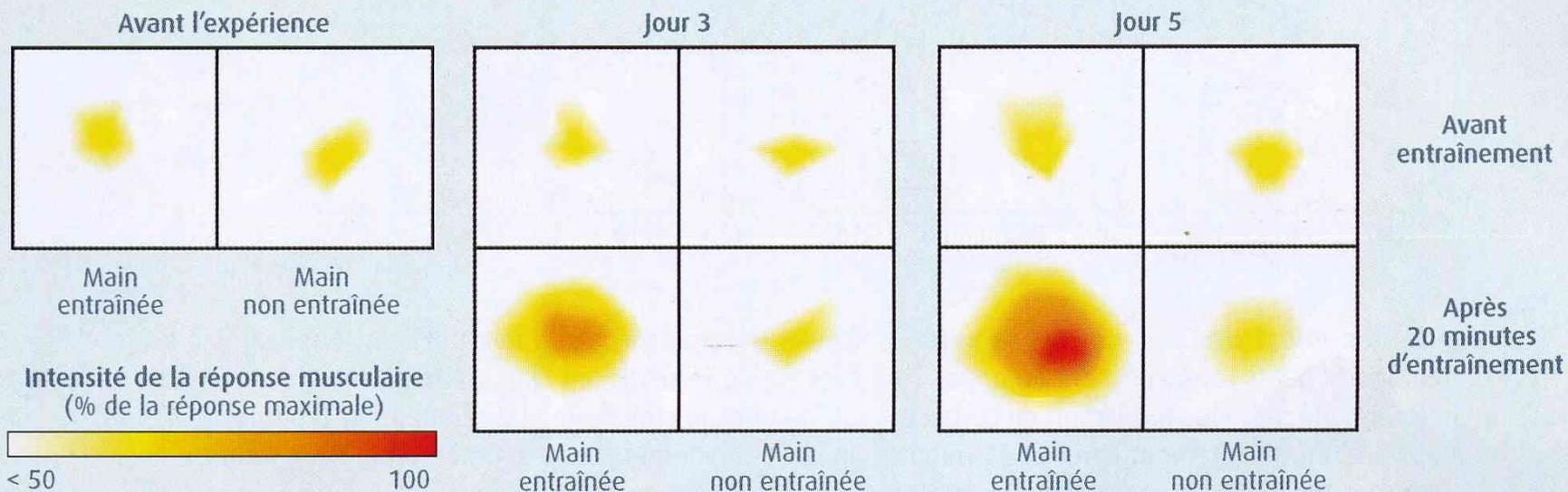


Sujet entraîné

Sujet non entraîné

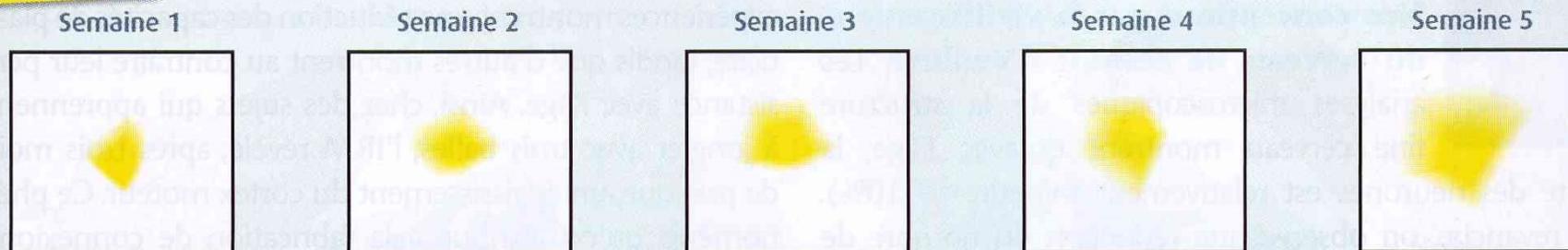
Effet de l'entraînement

Expérience 1



Une seule main est entraînée à un exercice de piano pendant 20 minutes. Les cartes motrices sont déterminées avant et après la séance d'entraînement, pour les deux mains. L'expérience est renouvelée pendant 5 jours consécutifs.

Expérience 2



Pendant 5 semaines consécutives, une seule main est entraînée quotidiennement à un exercice de piano du lundi au vendredi. Les cartes motrices de cette main sont déterminées le lundi avant chaque entraînement.

4 Des modifications des cartes motrices des muscles de la main lors de l'apprentissage du piano. Les cartes motrices sont obtenues par simulation transcranienne (SMT, voir doc. 2 p. 346) chez des individus non professionnels pour différents muscles fléchisseurs des doigts.

I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.**
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Paralysie suite à un AVC

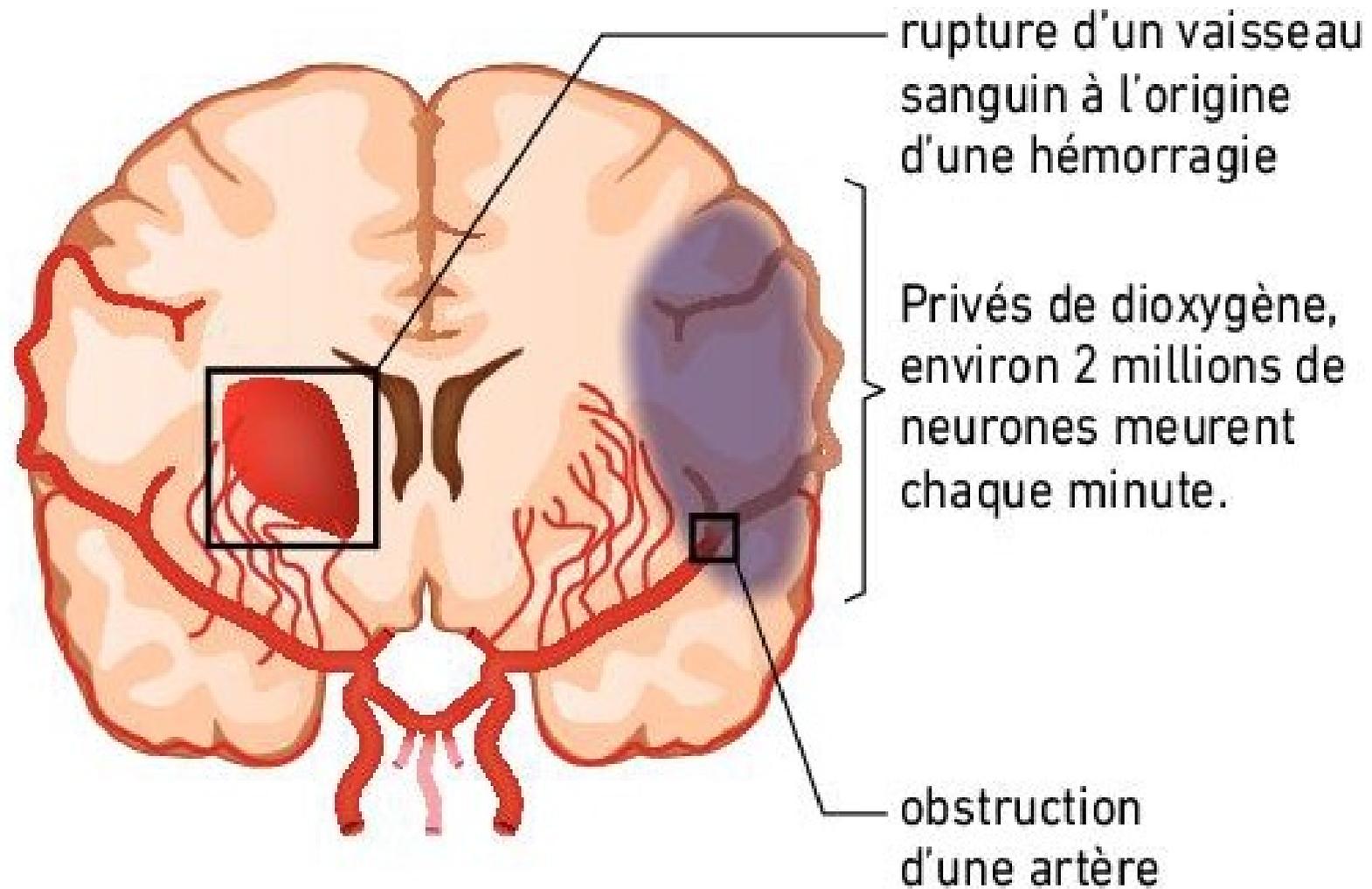


**importante atrophie
du tissu cérébral de
l'hémisphère droit**

IRM (coupe transversale au
niveau des hémisphères
cérébraux)

=> hémiparésie gauche

Causes des AVC



A Les causes des accidents vasculaires cérébraux.

Paralysies suite à une lésion de la moelle épinière



Paralysie générale: chute, accident de la circulation



Lésion de la moelle épinière au niveau des lombaires

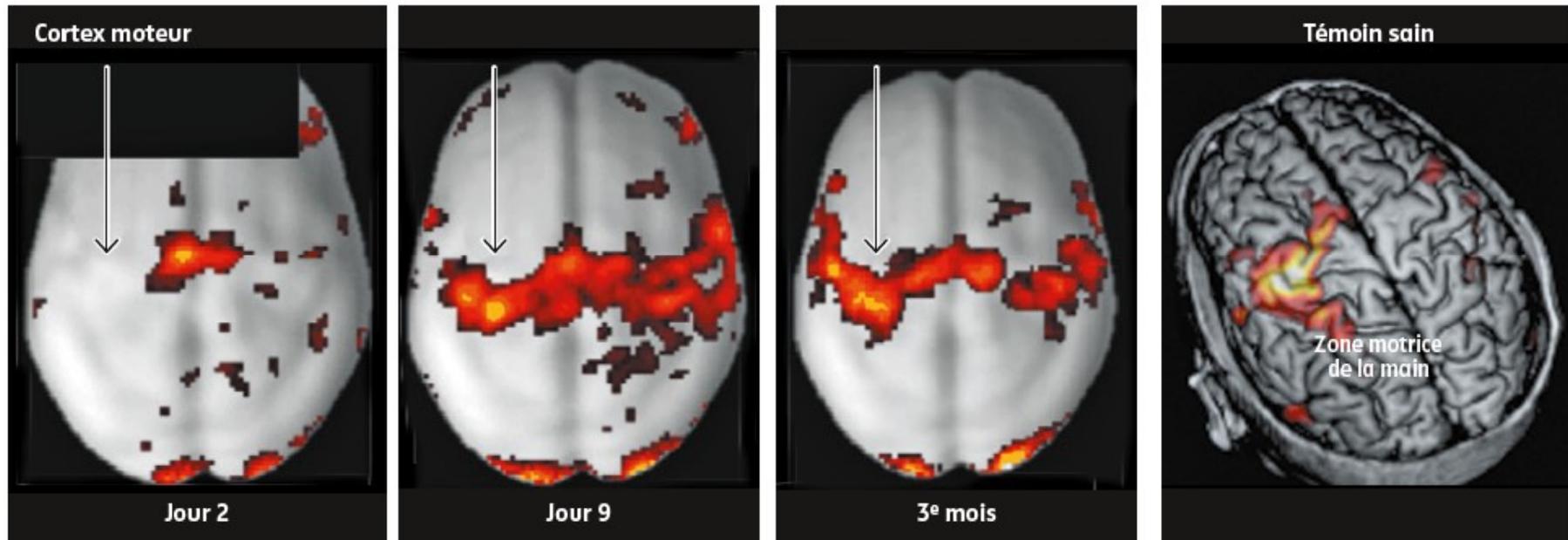
I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

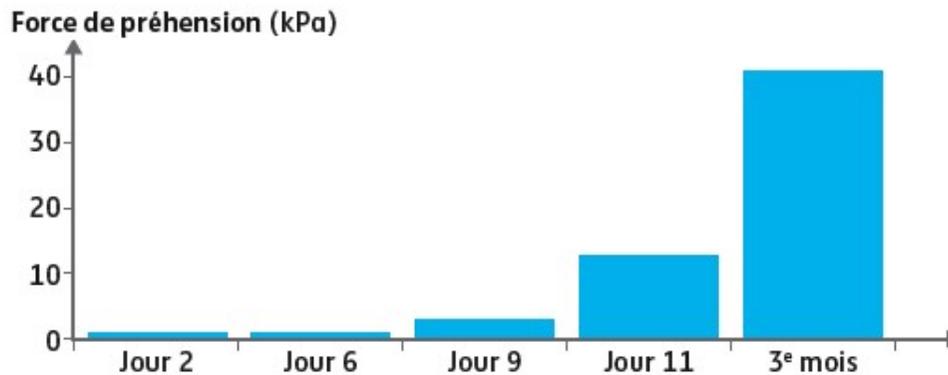
II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.

Un exemple de récupération après un AVC



▲ **IRM fonctionnelles montrant les zones cérébrales actives de Mme X lors de mouvements de la main droite au cours de sa récupération.** Au départ, lorsque la main est encore paralysée, les mouvements sont seulement imaginés. Le cortex moteur est fléché en noir. Un autre individu qui bouge la main droite est utilisé comme témoin.



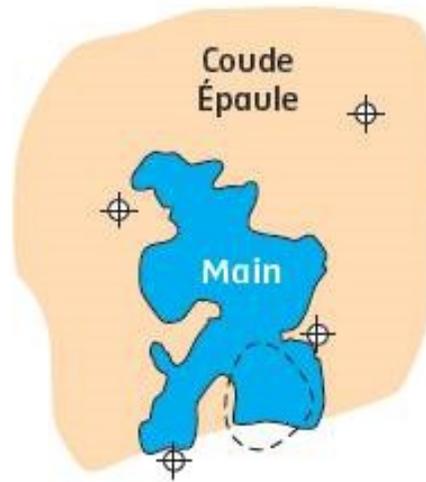
◀ **Force de préhension de la main droite de Mme X au cours des trois mois consécutifs à l'AVC.** Cette main est complètement paralysée juste après l'AVC.
NB : 40 kPa correspond à une force de préhension normale.

Source : Connectivity-based approaches in stroke and recovery of function, février 2014.

1 Un cas de récupération après un AVC : Mme X.
Pendant les trois mois de l'étude, Mme X a subi une rééducation intensive.

L'importance de la rééducation

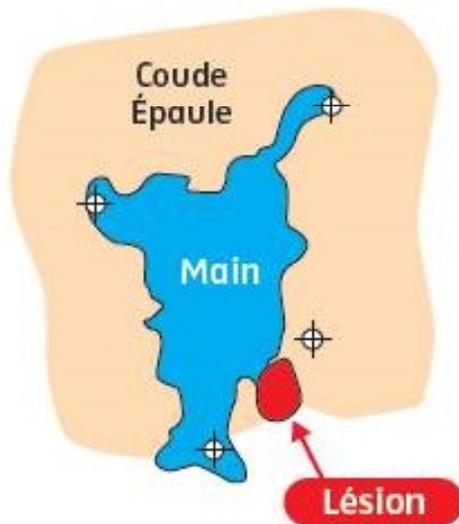
Avant lésion



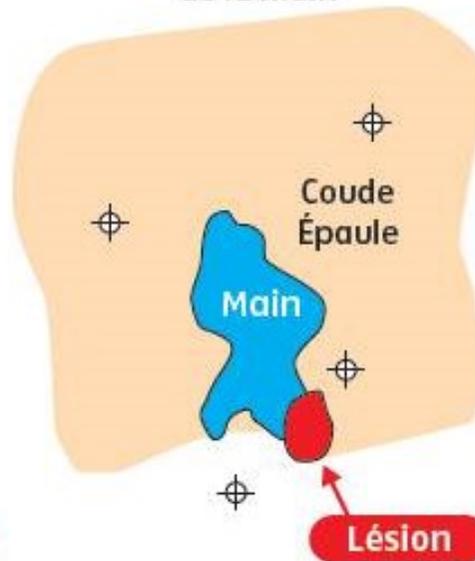
▲ Représentation de la main dans le cortex moteur de singes au cours d'une expérience consistant à provoquer dans ce cortex des lésions ressemblant à un AVC. Certains singes subissent ensuite une rééducation intensive de la main, d'autres non.

Source : d'après World Hellenic Biomedical Association - WHBA, Inc.

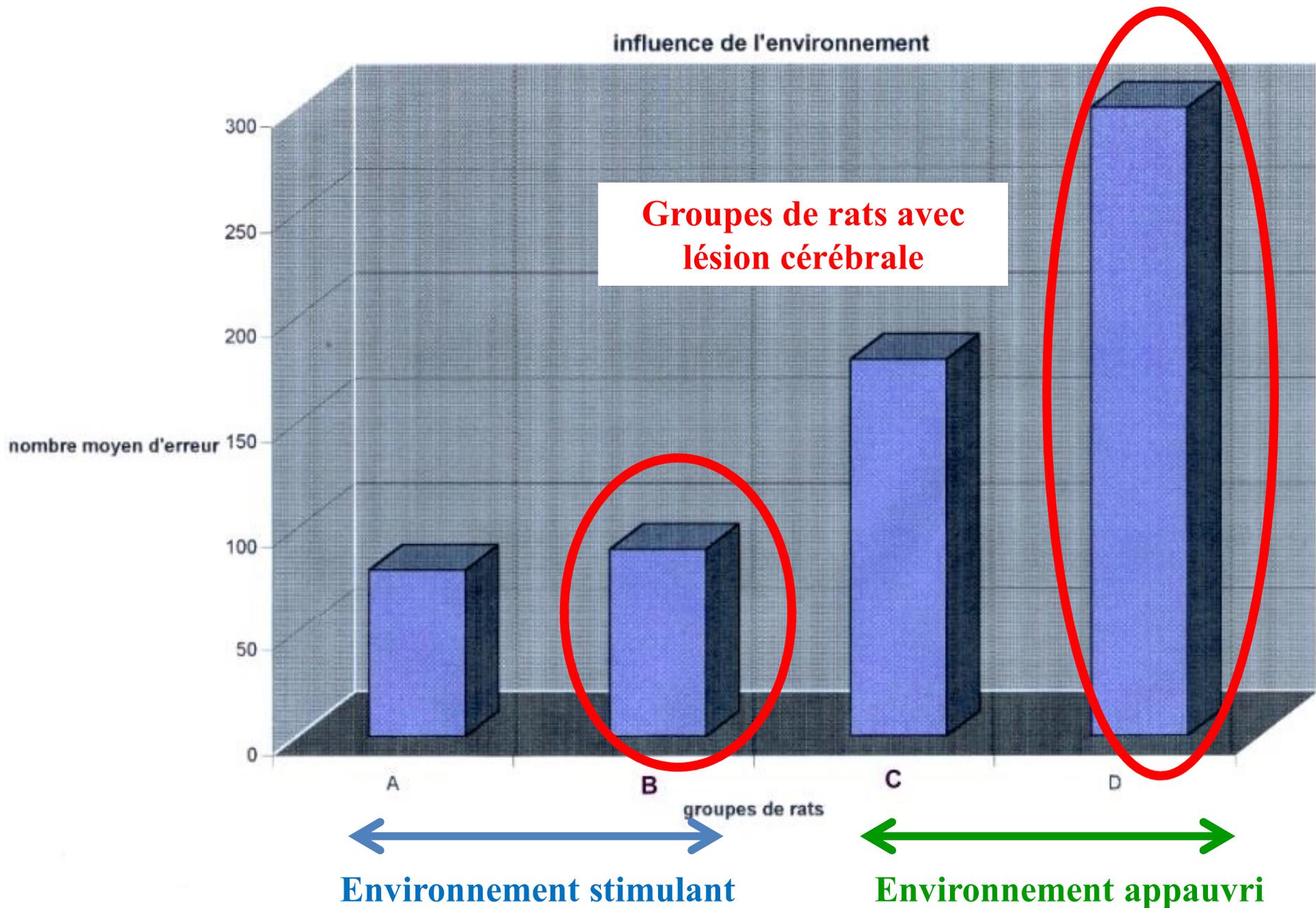
Quelques mois après lésion, avec rééducation de la main



Quelques mois après lésion, sans rééducation de la main



Influence de l'environnement



Récupération de la fonction motrice après une greffe

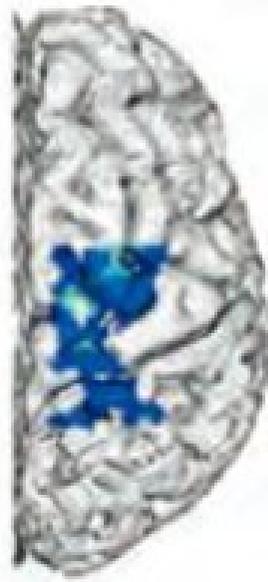


Récupération de la fonction motrice après une greffe

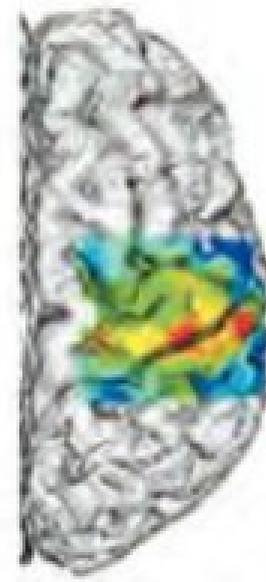
10 mois



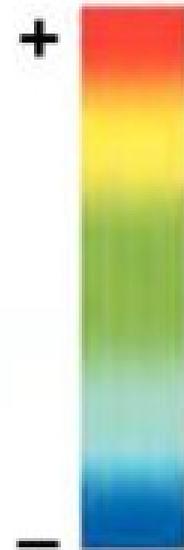
17 mois



26 mois

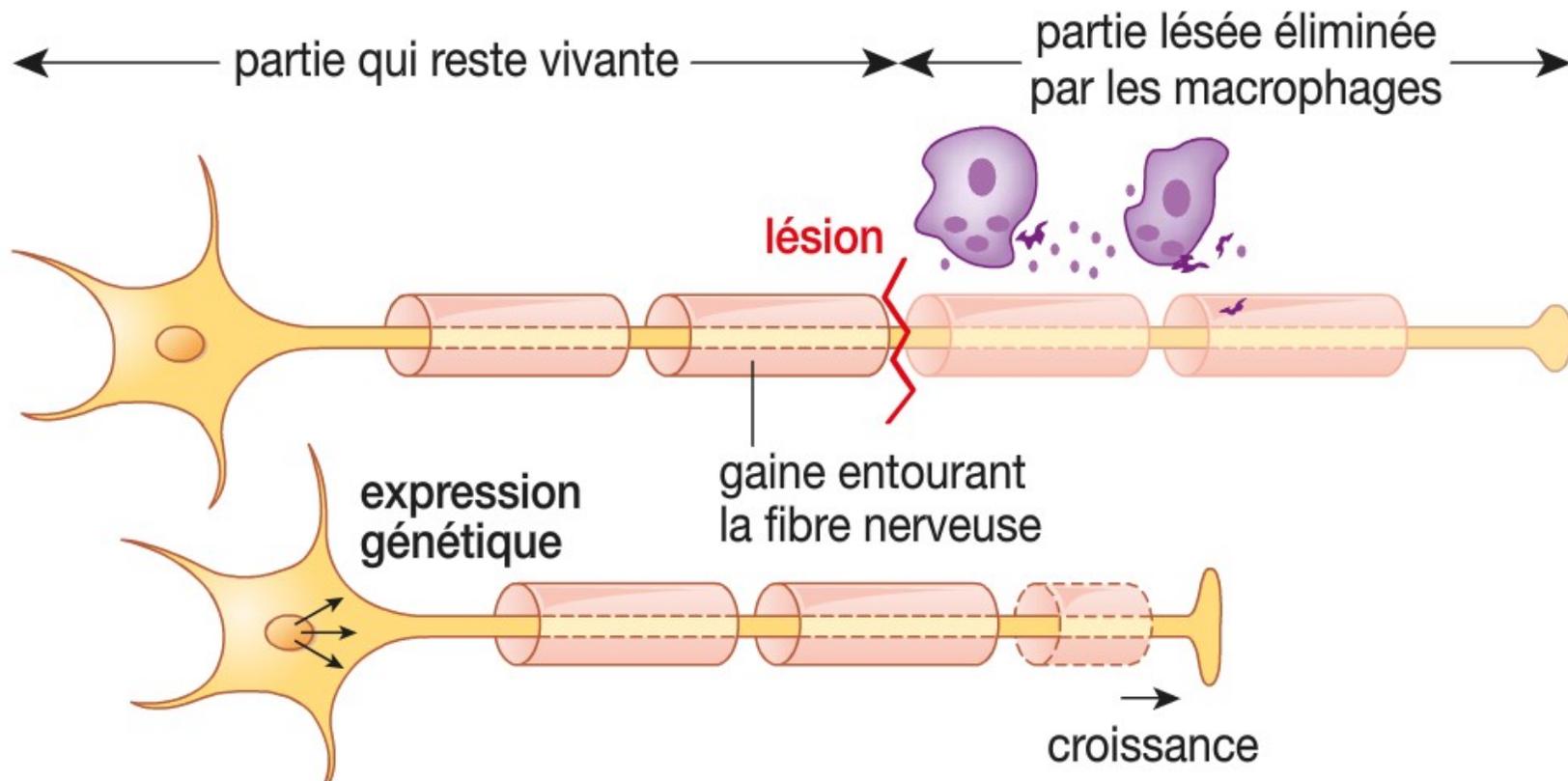
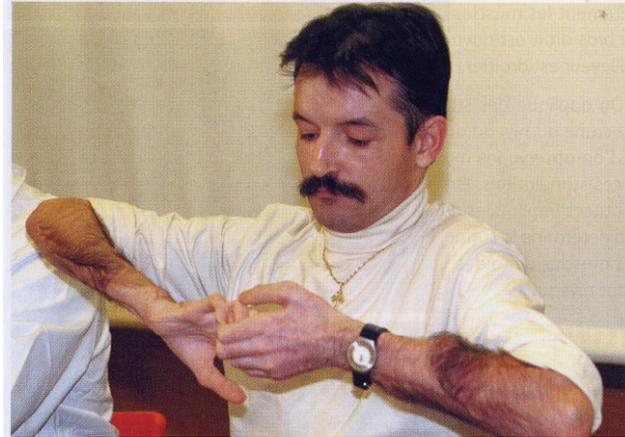


Activité



C Activité du cortex moteur (hémisphère droit) correspondant aux muscles assurant la mobilité de l'index gauche dans les mois suivant la greffe d'une main. (d'après Vargas et al, 2009)

Récupération de la fonction motrice après une greffe



La plasticité cérébrale

Développement

Apprentissage

Entraînement

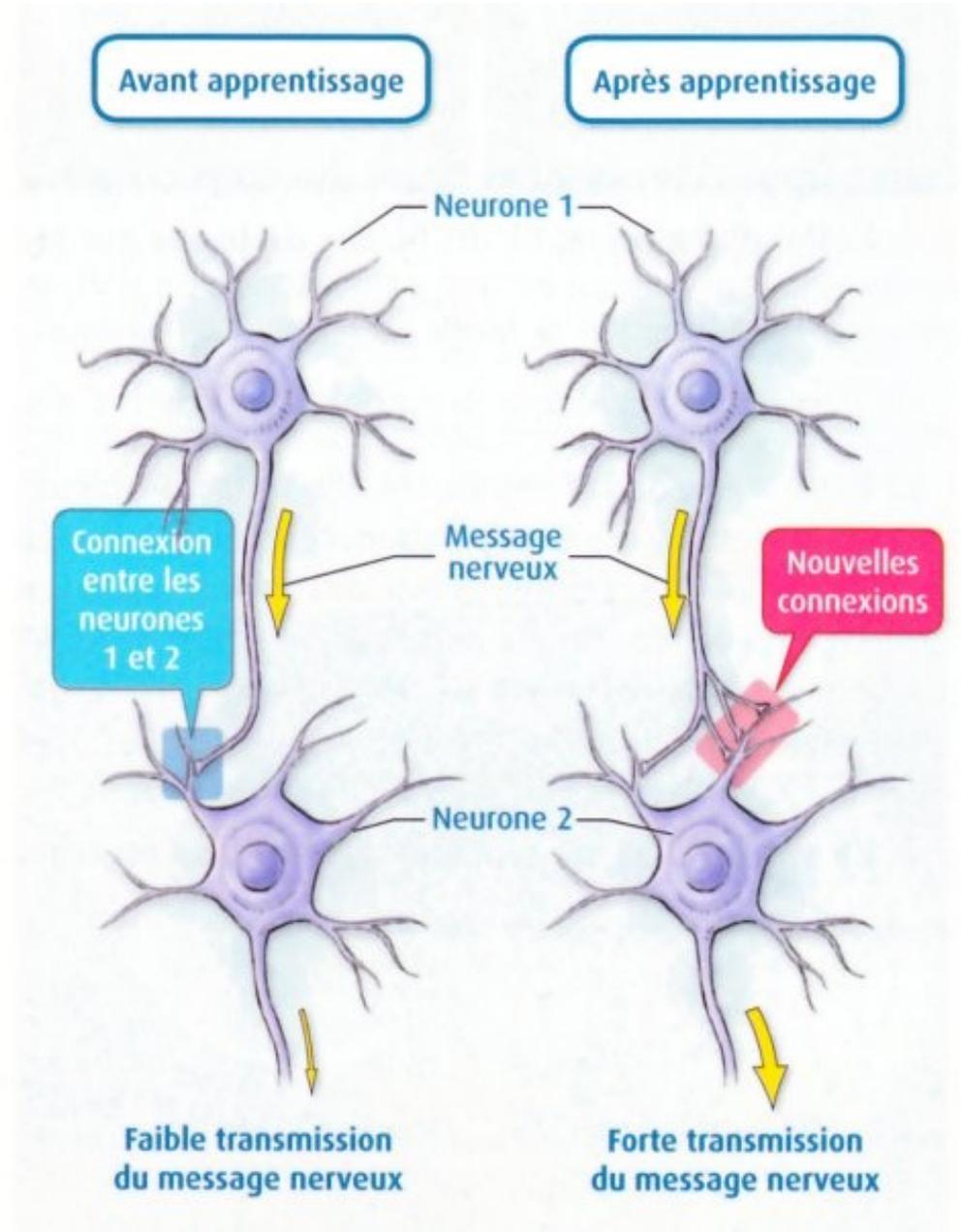
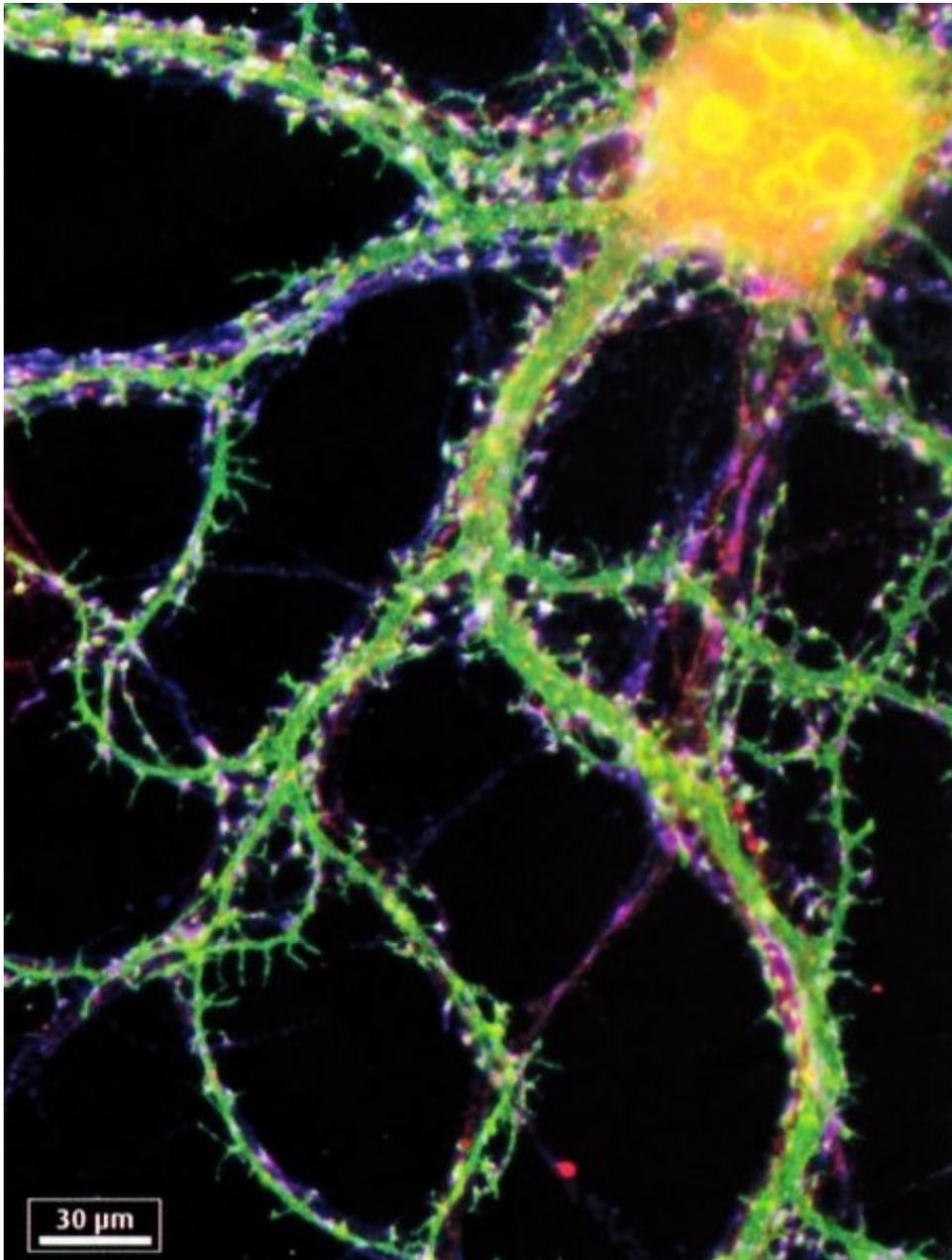
Réorganisation du cortex moteur
du fait de la plasticité cérébrale

Différences, plus ou moins importantes d'un
individu à l'autre, des zones du cortex moteur
contrôlant les différents muscles du corps

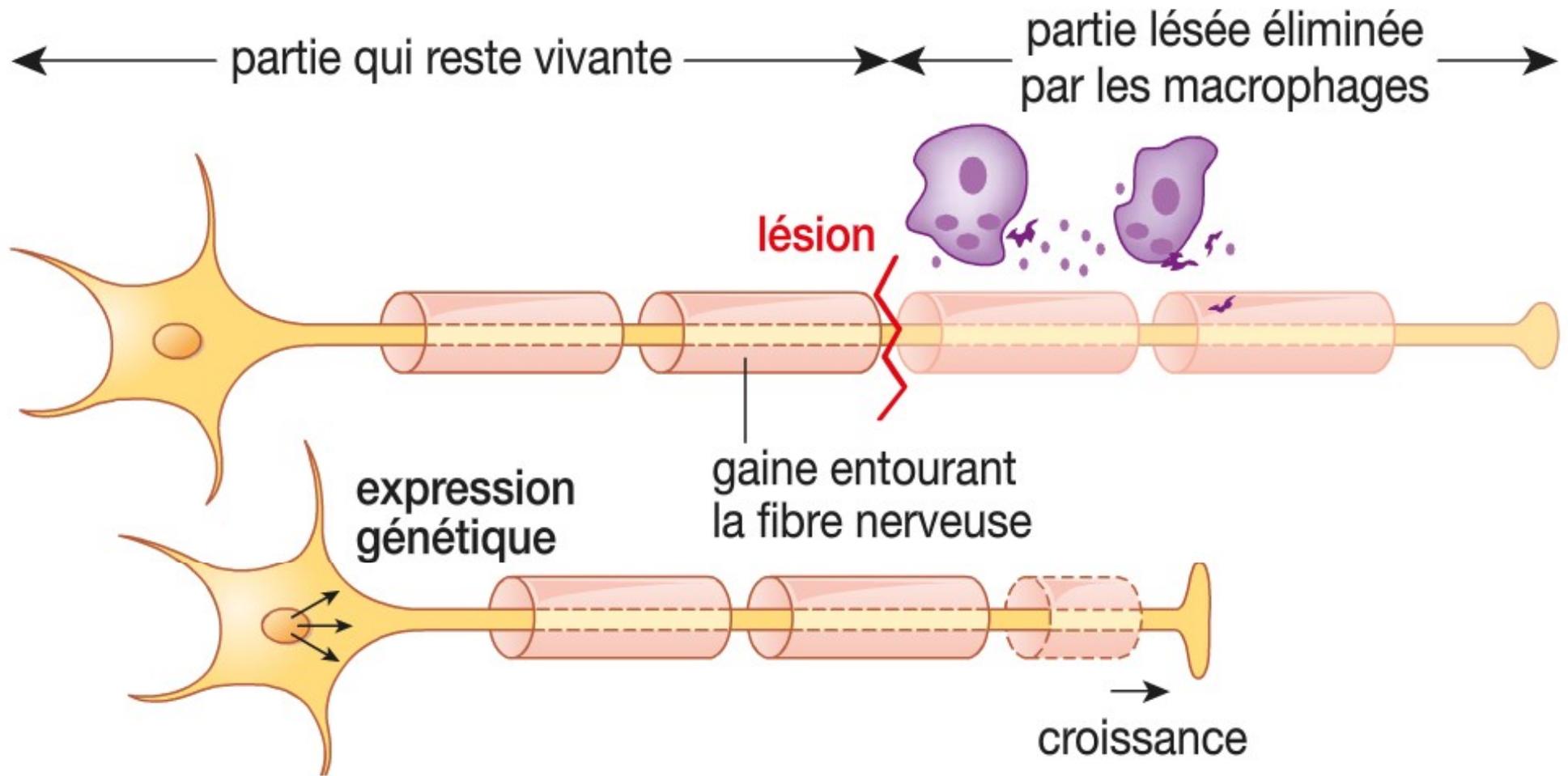
=

Diversité phénotypique du cortex moteur
au sein de l'espèce humaine

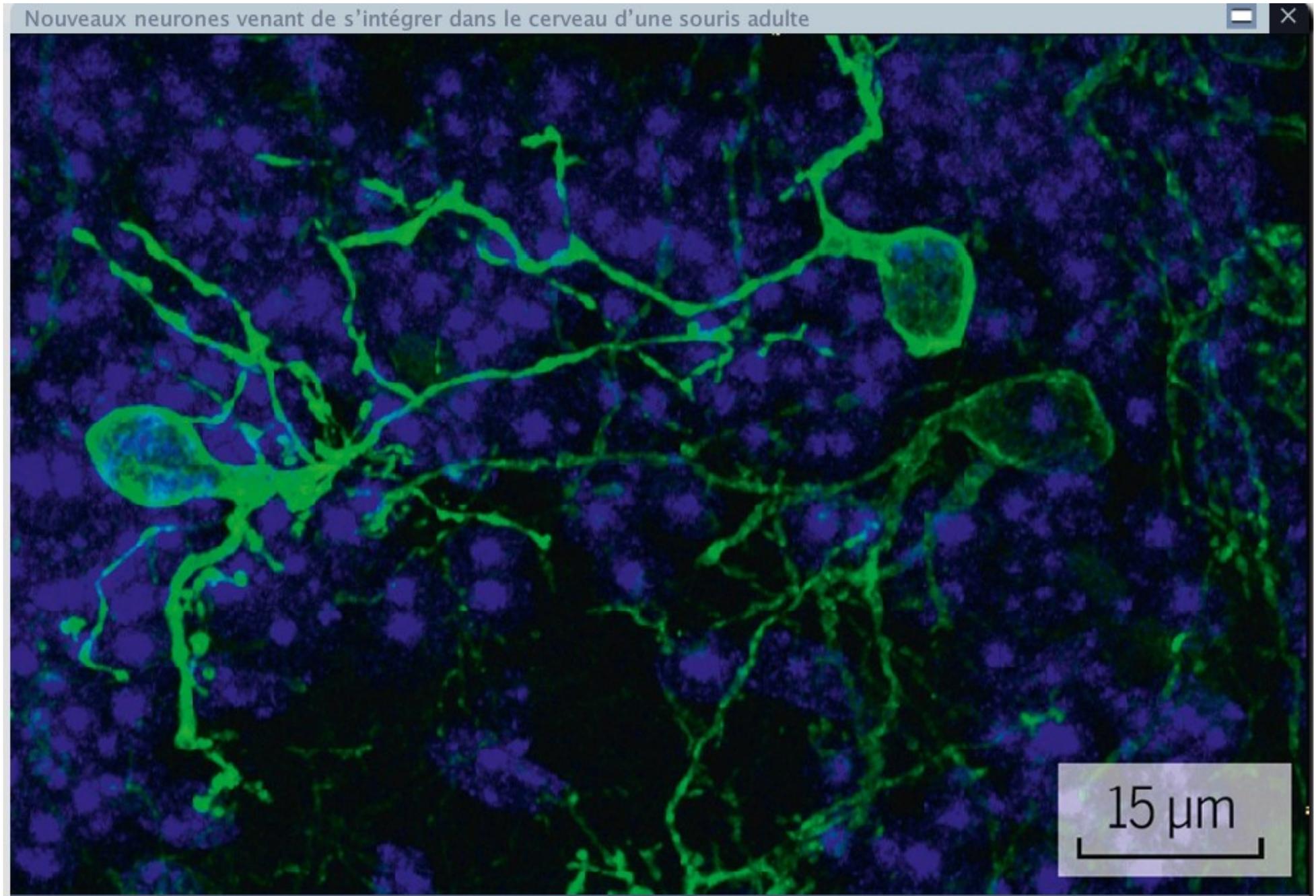
Les mécanismes neuroniques de la plasticité



Récupération de la fonction motrice après une greffe



Les mécanismes neuroniques de la plasticité



I. La commande volontaire du mouvement

- A. Le cerveau, un organe constitué de cellules spécialisées
- B. Les aires cérébrales spécialisées dans le mouvement volontaire
- C. Des aires motrices aux muscles : les voies motrices
- D. L'intégration neuronale par les motoneurones médullaires

II. La plasticité cérébrale

- A. Plasticité cérébrale et variations individuelles du cortex moteur.
- B. Plasticité cérébrale et capacité de récupération après une lésion.
 - 1. Conséquences d'une lésion du système nerveux central.
 - 2. Capacités de récupération après une lésion.
- C. Préserver et entretenir ses neurones.**

