



COMMANDER PAR LA PENSÉE

Gâce aux interfaces cerveau-ordinateur, on sait dès à présent jouer à un jeu vidéo uniquement avec son cerveau ou piloter par la pensée un fauteuil roulant, une prothèse de main...

Pour réaliser une interface cerveau-ordinateur, il faut capter puis utiliser les signaux qui résultent de l'activité électrique émise par notre cerveau quand nous décidons de réaliser une action.





L'activité électrique du cerveau

Le neurone est la pièce maîtresse de notre cerveau. Il est constitué de trois parties principales : le corps cellulaire, l'axone et les dendrites (Figure 1). Les neurones ne sont pas des fils électriques à la différence des axones dont les courants qui y circulent sont très rapides.



Un **neurone** est une cellule du système nerveux spécialisée dans la communication et le traitement des informations.

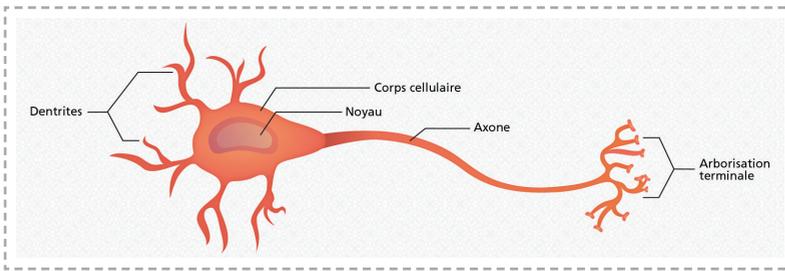


Figure 1

Dessin d'un neurone.

Pour bouger, voir ou entendre, les neurones de notre cerveau s'envoient des messages (Figure 2). Les neurones communiquent ensemble grâce à leur axone et à leur dendrite : l'axone est la bouche et la dendrite est l'oreille.

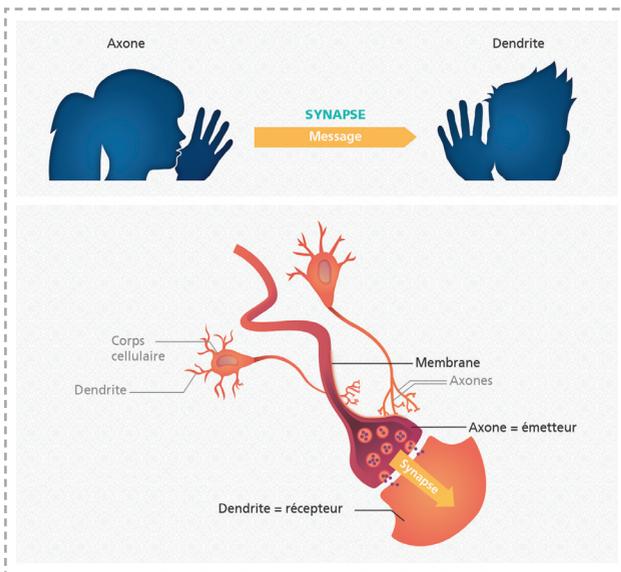


Figure 2

Principe de communication entre les neurones.



Comment les neurones communiquent-ils ?

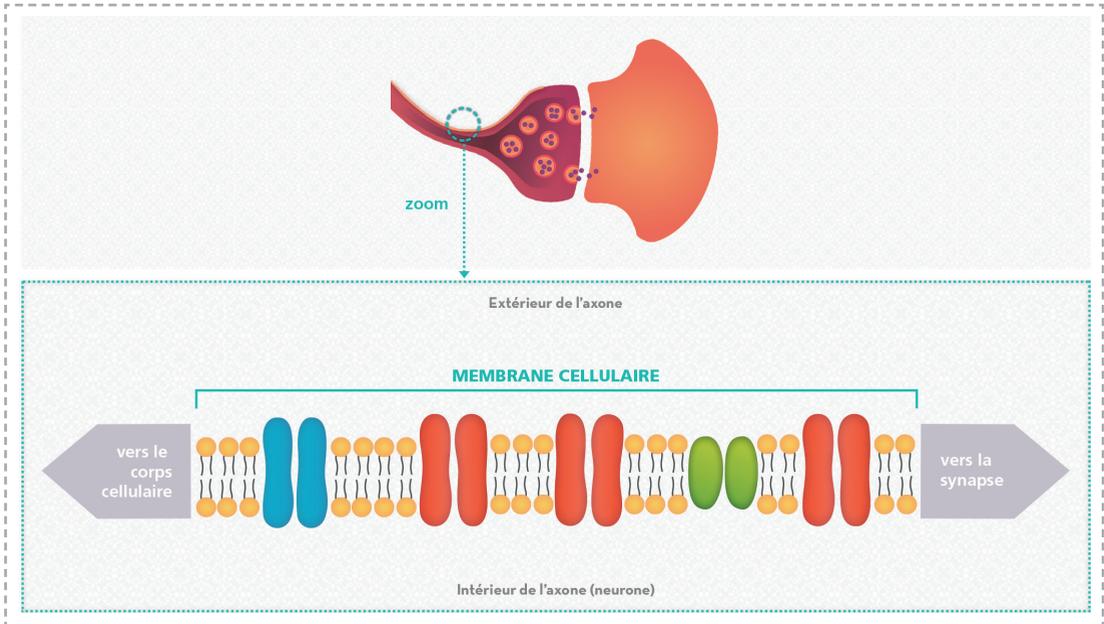


Les lipides sont la famille des molécules qui constituent la matière grasse des êtres vivants.

Chaque neurone (*Figure 2*) est entouré d'une membrane constituée de grosses molécules de la famille des lipides qui le séparent du monde extérieur, comme notre peau le fait pour notre corps. Cette membrane est dessinée sur la *figure 3* où l'on voit les molécules de lipides alignées parallèlement et représentées par les boules jaunes avec deux queues.

Figure 3

Dessin de la membrane d'un neurone.



Les ions sont des éléments chimiques chargés positivement ou négativement, respectivement par perte ou gain d'électrons. Le déplacement des ions crée un courant électrique. C'est ce phénomène qui se passe à l'intérieur des batteries.

Le corps humain contient des ions dont les plus importants pour le fonctionnement des neurones sont le sodium, le potassium et le calcium qui portent des charges électriques positives (Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) et les ions chlorures qui portent une charge électrique négative (Cl^-).



Quand les neurones sont muets

Dans les conditions normales, ces ions sont présents en quantité différente à l'intérieur et à l'extérieur des neurones.

Les canaux ioniques sont comme des portes, ouvertes ou fermées, situées dans la membrane et qui permettent, uniquement aux ions, de rentrer ou de sortir du neurone. Ces canaux ioniques sont représentés en rouge, bleu et vert sur la *figure 3*.

À l'intérieur du neurone, il y a aussi des grosses molécules de protéines en excès qui portent des ions négatifs (représentés en mauve) mais qui ne peuvent jamais sortir par les canaux ioniques du fait de leur taille (*Figure 4*).

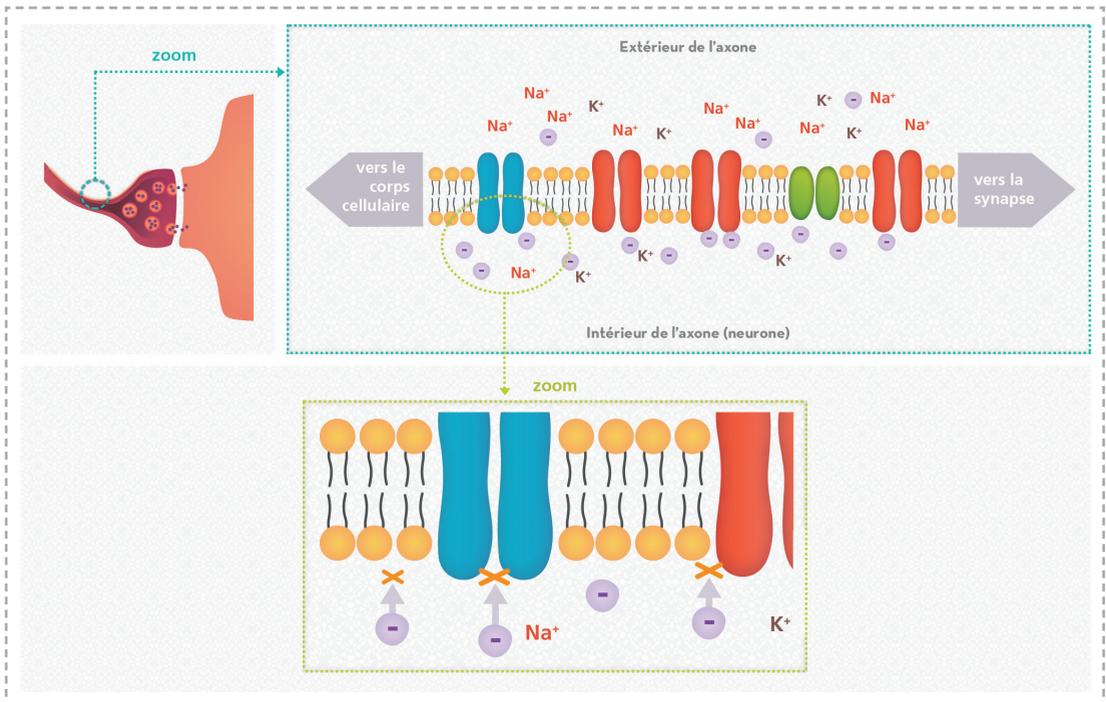


Remarque

Au repos, il y a beaucoup plus d'ions sodium à l'extérieur du neurone.

Figure 4

Canaux ioniques fermés : pas d'échange d'ions au travers de la membrane.





La **synapse** est l'espace situé entre l'axone d'un neurone (émetteur 1) et la dendrite d'un neurone (récepteur 2), à travers lequel va se faire la transmission de l'information, sous forme de molécules chimiques (les neurotransmetteurs) et d'un courant électrique produit par le déplacement des ions.



Remarque

Les ions de même charge se repoussent et les ions de charge différente s'attirent.

Figure 5A

Canaux ioniques ouverts : échange d'ions au travers de la membrane.

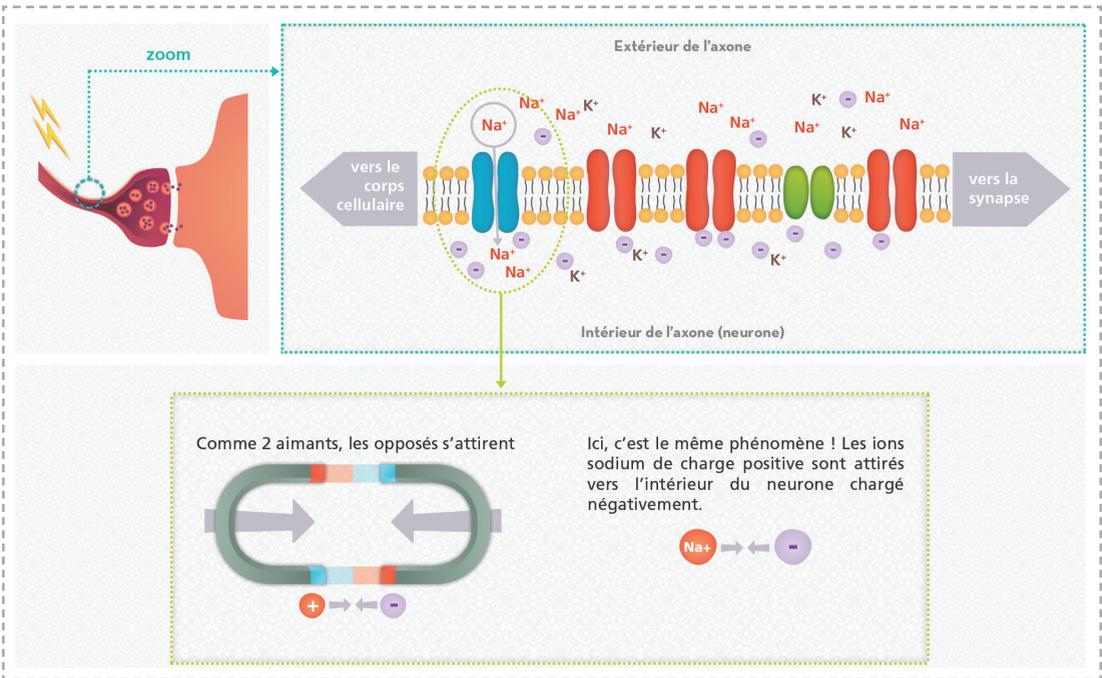
Quand les neurones se parlent

Quand le cerveau émet un message, il envoie une excitation sous forme de signal électrique :

- le signal circule dans le neurone sous forme d'un courant électrique, créé par un déplacement d'ions chargés positivement ;
- le passage d'ions chargés et de molécules d'un neurone à l'autre, à travers l'espace appelé synapse, permet aux neurones de se parler et donc de transmettre le message.

Le courant électrique dans les neurones

Quand un neurone reçoit une excitation électrique (par exemple, un excès d'ions positifs), les canaux ioniques bleus de la *figure 5A* s'ouvrent et les ions sodium, plus nombreux à l'extérieur, se précipitent à l'intérieur du neurone.

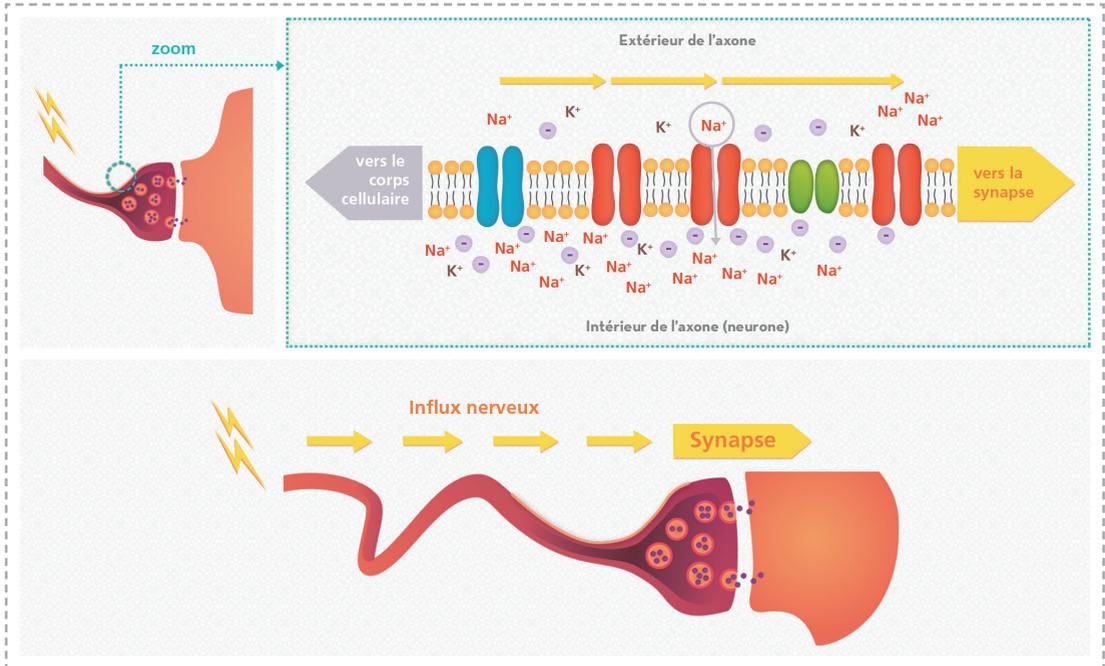




Ainsi, les ions Na^+ qui entrent, repoussent les premiers arrivés et la zone d'ions positifs se déplace vers le canal ionique rouge, ce qui déclenche l'ouverture de ce dernier (Figure 5B) permettant alors à de nouveaux ions Na^+ extérieurs d'entrer dans le neurone.

Figure 5B

Création d'un influx nerveux.



Remarque

Quand l'intérieur du neurone devient trop « positif », l'ouverture des canaux ioniques se déclenche laissant passer ainsi les ions potassium. Ces ions K^+ , plus nombreux à l'intérieur du neurone, se précipitent à l'extérieur pour ramener le neurone à son état de charge initial.

Un nuage d'ions positifs se déplace ainsi, de proche en proche, à l'intérieur du neurone et produit le courant électrique qui circule dans l'axone comme dans un fil électrique.

Inversement, à l'extérieur de la membrane du neurone, il y a de proche en proche un appauvrissement d'ions positifs, équivalent à la circulation d'un courant électrique en sens inverse.

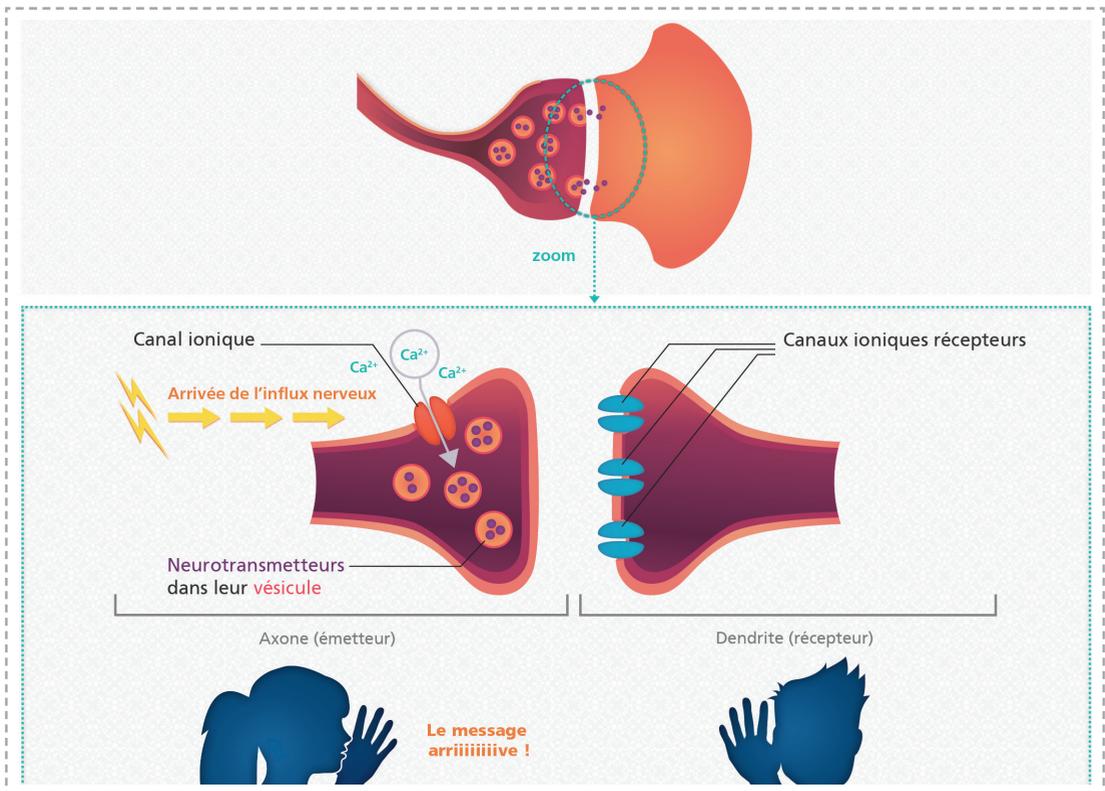


Le passage du courant électrique entre les neurones

Figure 6

La synapse, espace entre deux neurones.

Quand la charge positive, liée à l'entrée massive des ions Na^+ , arrive vers l'extrémité de l'axone, elle déclenche alors l'ouverture des canaux ioniques rouges qui baignent dans une soupe d'ions Ca^{2+} comme le montre la *figure 6*.



Les neuromédiateurs,

aussi appelés neurotransmetteurs, sont des molécules qui assurent le transport de l'information. Présents dans les neurones, ils sont stockés dans des petits sacs nommés vésicules et sont localisés au voisinage des synapses.

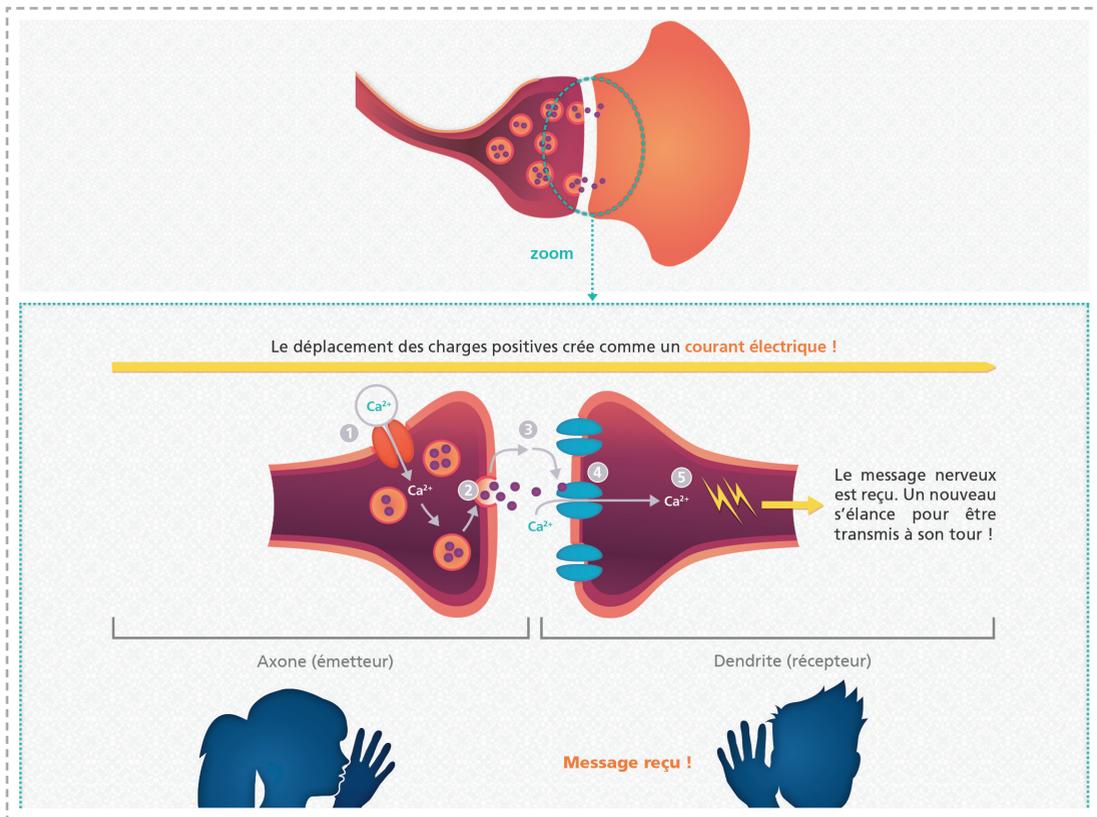
Quand la quantité de calcium augmente, les vésicules qui contiennent les neurotransmetteurs s'ouvrent. Les molécules de neurotransmetteurs libérées migrent à travers la membrane du neurone émetteur, puis dans la synapse pour aller se lier aux récepteurs de la dendrite (l'oreille) du neurone récepteur voisin (représentés en bleu sur la *figure 7*).



Ces récepteurs sont aussi des canaux ioniques ouverts et laissent donc entrer les ions calcium positifs. Ces ions se précipitent à l'intérieur de la dendrite qui, ainsi que le corps cellulaire relié, prennent alors une charge électrique positive, déclenchant à son tour l'ouverture des canaux ioniques permettant l'entrée des ions Na^+ dans l'axone du neurone récepteur.

Remarque
Ce déplacement d'ions positifs dans le neurone et d'un neurone à l'autre est donc l'équivalent d'un courant électrique.

Figure 7 Passage de l'influx nerveux à travers la synapse.



Remarque

L'importance du rôle des ions et notamment ceux de calcium, sodium et potassium dans l'activité cérébrale, explique pourquoi il est important de vérifier dans les analyses de sang que leur quantité correspond à la valeur normale.

Remarque

Ces charges se déplacent à très grande vitesse : de 1 à 100 mètres par seconde soit à 360 km/h, c'est-à-dire plus vite que la vitesse d'un avion qui décolle (250 km/h).



Le courant électrique à l'extérieur des neurones

Les entrées et sorties d'ions se font en sens inverse dans la matière cérébrale dans laquelle baigne le neurone, et donc conduisent elles aussi à des courants électriques mais en sens opposé.

Cette activité électrique extérieure est détectée par une technique appelée l'électroencéphalographie (EEG).



Remarque

Ces courants électriques extérieurs sont d'intensité très faible, de l'ordre de $1/1\ 000\ 000\ 000$ d'ampère.

Les électroencéphalogrammes (EEG)

Pour que l'activité électrique du cerveau puisse être détectée par électroencéphalographie, il faut que des déplacements de charges semblables à celles décrites précédemment soient créés au même moment et dans le même sens dans une zone du cerveau suffisamment étendue, sachant qu'il y a environ $10\ 000$ neurones/mm³.

Ces courants sont le plus souvent captés à la surface du crâne par des électrodes dans des zones voisines de celles actives du cerveau (celles qui communiquent). Plus il y a d'électrodes, plus l'analyse des courants du cerveau et des messages auxquels ils sont associés est précise.

Les chimistes doivent mettre au point des électrodes très sensibles pour détecter ces faibles courants et collaborer avec des électroniciens pour amplifier le signal perçu.



Remarque

Les électrodes sont disposées sur un bonnet posé sur le crâne du patient ou du sujet.



Remarque

Le nombre d'électrodes nécessaires varie d'une vingtaine pour commander des jeux simples jusqu'à plusieurs centaines dans des applications médicales ou les études du cerveau.



Remarque

Les sciences qui étudient notre cerveau sont dites cognitives.

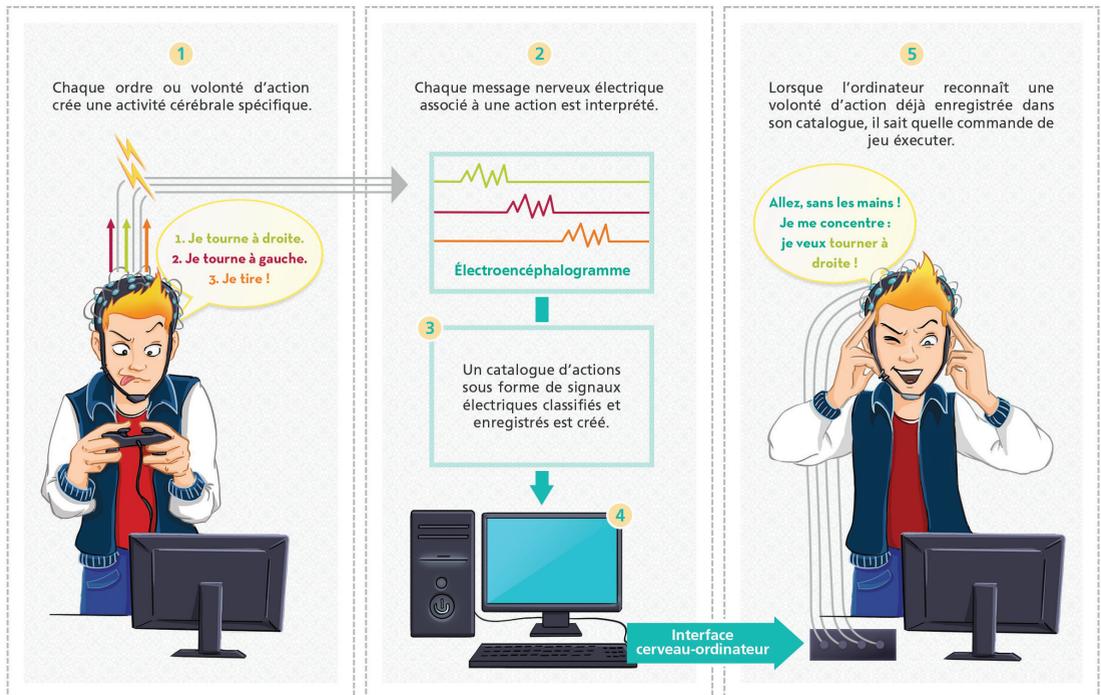


Utiliser les courants du cerveau pour piloter un ordinateur

Dans une interface cerveau-ordinateur, les courants captés par les électrodes de mesure sont transformés en signaux adaptés au pilotage de l'ordinateur (Figure 8).

Figure 8

Principe de commandes par la pensée.



Les exemples d'applications vont du domaine multimédia et du divertissement à la lutte contre le handicap. Voyons quelques exemples.

Un vaisseau spatial tu soulèveras

L'expérience se déroule dans la salle de réalité virtuelle appelée Immersia du centre de recherches de l'INRIA à Rennes.



Remarque

L'INRIA est un organisme de recherche dédié aux sciences et technologies du numérique.



Cette salle est l'une des plus grandes au niveau mondial qui permet de s'immerger dans un monde en 3D en stéréoscopie. Tout se passe comme si on était devant un écran de cinéma en 3D où tout se voit, autour de soi, en relief. La situation est représentée sur la *figure 9*. C'est une séquence inspirée du film « L'Empire contre-attaque », saga de la « Guerre des étoiles » de Georges Lucas.



Figure 9

La salle immersive Immersia (Inria/IRISA, Rennes).

Figure 10

Commander par la pensée via un casque muni d'électrodes.



Figure 11

Une des applications de divertissement de la salle Immersia.

En s'équipant d'un casque (du type EEG) à électrodes portable Blue Tooth sans fil à 16 électrodes (*Figure 10*), on peut, comme le héros Luke Skywalker, se concentrer et soulever par la force de la pensée le vaisseau spatial virtuel (*Figure 11*). Que la force soit avec toi !



Contrôler par la pensée, un jeu vidéo

Le jeu vidéo « mineshotter » est développé par une équipe de l'INRIA de Rennes. Le joueur doit concentrer son attention sur des cibles lumineuses qui clignotent à trois vitesses différentes (A, B, C).

Quand le joueur se concentre visuellement sur la cible A, la vitesse de clignotement de cette cible se retrouve dans le courant émis par la



zone visuelle correspondante de son cerveau. Ce courant peut alors être utilisé pour activer une commande de l'ordinateur vers cette cible.

L'entraînement permet au joueur de devenir plus efficace (Figure 12).

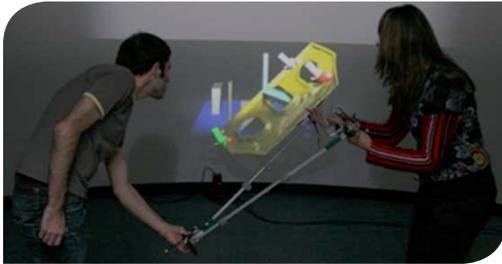


Figure 12

Le jeu « mineshooter » (exemple de recherche en réalité virtuelle, interface cerveau-ordinateur).

Piloter un objet par la pensée

Des prototypes permettent, dès à présent, de piloter par la pensée un fauteuil roulant, une prothèse...

Ainsi, par exemple, des patients paralysés peuvent retrouver une motricité grâce à des prothèses pilotées par l'activité cérébrale des aires qui contrôlent nos mouvements : les aires motrices (Figure 13).

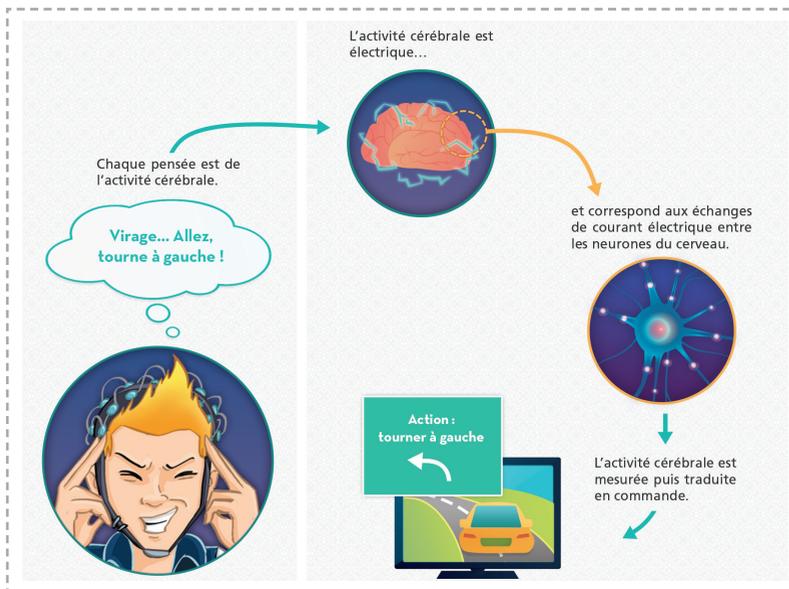


Figure 13

De la pensée à l'action.



Cette possibilité d'interagir sans bouger, uniquement à partir de l'activité cérébrale, a aussi été utilisée pour contrôler une multitude d'autres objets tels que des robots et des voitures, même si aujourd'hui, nous sommes encore loin des performances obtenues avec un clavier et une souris.

Dans ces exemples d'application, c'est toujours l'activité électrique des neurones du cerveau qui est utilisée.



Remarque

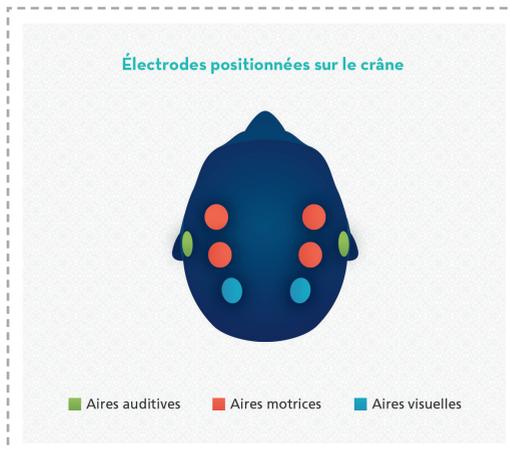
Cette activité électrique est mesurée à la surface du crâne par un bonnet à électrodes en utilisant les systèmes d'électroencéphalographie des médecins.

Les courants du cerveau sont différents et sont détectés dans des zones dissemblables selon la nature et le type d'action que l'on décide de faire (*Figure 14*) :

- si on utilise les yeux, on mesurera un courant dans les aires visuelles ;
- si on utilise les oreilles, ce sera dans les aires auditives ;
- si on utilise les membres, cela concernera les aires motrices.

Figure 14

Localisation des différentes aires du cerveau.





Comment utiliser efficacement les courants du cerveau ?

❶ Il faut identifier, dans le courant enregistré par chaque électrode, les signaux qui correspondent à une action donnée, c'est-à-dire à un ordre du cerveau tel que :

- ouvrir ou fermer les yeux ;
- imaginer un mouvement de la main gauche ou de la main droite.

Cette identification est difficile et demande un travail important d'analyse et de classification, fait par des mathématiciens.

❷ Une fois que les signaux associés à un ordre du cerveau sont identifiés et classés, il faut les traduire en commandes pour l'ordinateur. Par exemple, imaginer un mouvement de la main gauche ou de la main droite doit être associé à bouger une souris ou un curseur d'ordinateur vers la gauche ou vers la droite.

❸ La dernière étape est un retour visuel, auditif ou tactile, vers l'utilisateur pour lui permettre de s'entraîner et mieux contrôler son activité cérébrale.

L'évolution du matériel

Il existe pour des patients, sévèrement paralysés, des systèmes dans lesquels les électrodes de détection sont implantées à l'intérieur du crâne, mais plus fréquemment les systèmes utilisent des électrodes posées sur la surface du crâne pour enregistrer les signaux électriques.

Une autre tendance est de remplacer les électrodes médicales humides, qui utilisent du gel pour assurer une bonne captation de l'activité électrique, par des électrodes sèches plus confortables mais qui doivent donc être très sensibles.

Une autre évolution récente, conçue dans une optique d'application aux jeux vidéos, est le développement des casques grand public qui



Remarque

La tendance actuelle est d'augmenter le nombre de capteurs avec des systèmes EEG allant jusqu'à 200 parfois 500 capteurs.



peuvent être achetés directement sur Internet et dont le prix (250 €) est beaucoup moins élevé que celui des casques médicaux (15 000 à 30 000 €).

Il reste cependant aux chimistes et électroniciens à améliorer les capteurs, c'est-à-dire les électrodes, pour rendre les systèmes plus efficaces, moins encombrants et plus faciles à utiliser.

Il faut également améliorer l'identification et la classification des signaux du cerveau pour filtrer les signaux caractéristiques de l'activité cérébrale que l'on souhaite utiliser, ce qui implique une collaboration étroite avec les spécialistes des neurosciences.

Les perspectives pour l'avenir



Dans un jeu de « Hand Ball Virtuel » où il faut marquer des buts

à gauche ou à droite, les joueurs peuvent, soit jouer ensemble, soit jouer l'un contre l'autre. Il faut mobiliser l'imagination du mouvement de sa main gauche ou de sa main droite en fonction de la direction où l'on veut tirer (Figure 15).

Ces interfaces cerveau-ordinateur multi-utilisateurs permettent aujourd'hui à plusieurs personnes d'interagir ensemble avec leurs cerveaux, même à distance, soit pour coopérer, soit pour s'affronter mentalement.

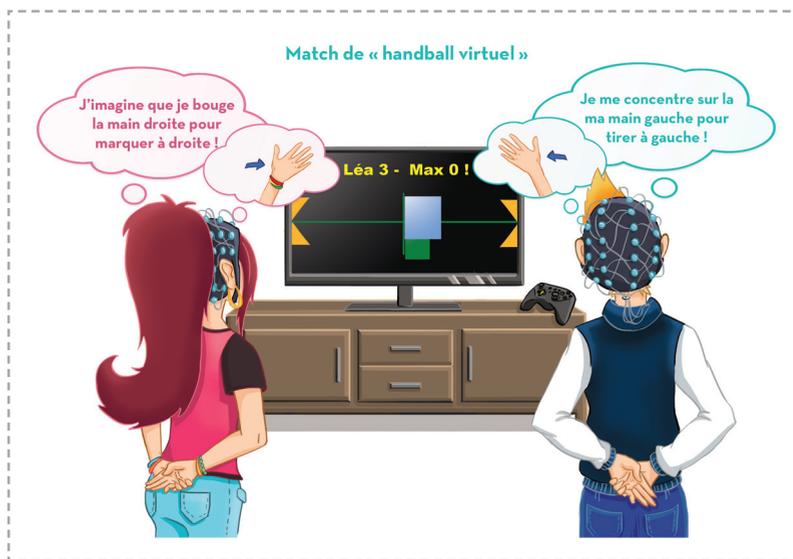


Figure 15

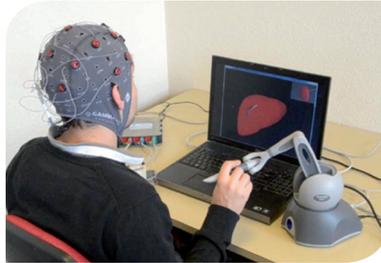
Interface cerveau-ordinateur multi-utilisateurs (exemple du « handball virtuel », se concentrer sur l'action pour diriger le mouvement).



L'interface cerveau-ordinateur peut aussi être utilisée comme outil d'assistance pour mesurer et surveiller l'activité cérébrale et par exemple détecter une fatigue mentale élevée. Cette application a été testée dans un simulateur de formation médicale en réalité virtuelle (Figure 16).

Figure 16

Simulateur médical « adaptatif » par interface cerveau/ordinateur permettant à un chirurgien par exemple de s'exercer à pratiquer des actes chirurgicaux.



Dans cet exemple, si une fatigue mentale est détectée sur un apprenant qui s'entraîne sur des actes chirurgicaux, un système d'assistance visuelle ou haptique est activé.

Il existe dès à présent des prototypes impressionnants utilisant différents types d'activité cérébrale dans différents domaines d'application. Cependant, le développement de ces technologies en est à ses débuts, comparable à celui des technologies de reconnaissance vocale il y a vingt ans.

Les domaines d'application attendus sont très nombreux : le domaine médical, le handicap, la rééducation mais aussi le multimédia et le contrôle d'engins variés.

Conclusion

La recherche dans ce domaine est active partout dans le monde notamment aux États-Unis, en Autriche et au Japon et de plus en plus en France. Elle exige la collaboration des scientifiques de la chimie, des mathématiques, de l'électronique, des neurosciences et des médecins.