

La simplicité

Alain Berthoz, académicien, professeur au Collège de France, est un physiologiste mondialement connu pour ses travaux et ses publications dans le domaine des neurosciences cognitives², en particulier dans l'étude du mouvement (voir bibliographie « Pour en savoir plus »). Il a récemment publié un livre sur la « simplicité ». Il montre les applications de ce concept au sport et le besoin d'encourager les coopérations qui n'existent peut-être pas assez dans ce domaine avec les chimistes et les neuropharmacologues.

Le mot « simplicité » a été utilisé depuis très longtemps ; mais l'idée est ici que l'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et à l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des principes simplificateurs.

Ces principes ne sont pas forcément simples et demandent parfois des détours et une certaine complexité dans les mécanismes, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. Il est étonnant de voir que

l'on retrouve aujourd'hui ces principes simplificateurs un peu partout dans l'immense quantité des publications qui décrivent la complexité du vivant, tant au plan génétique, chimique, mécanique et neuronal...

QU'EST-CE QUE LA SIMPLICITÉ ?

L'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des « principes simplificateurs ». Ils ne sont pas simples, ils exigent parfois des détours, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. On trouve ces mécanismes « simples » du niveau génétique jusqu'aux fonctions cognitives les plus élevées.

Dans le cadre du sport, on trouve ces principes simplificateurs dans les mécanismes de contrôle du mouvement, les processus de décision, d'anticipation et dans le traitement et la mémoire de l'espace. Cependant, il est aussi nécessaire, à toutes les étapes, de

2. Les neurosciences cognitives sont un domaine de recherche dans lequel sont étudiés les mécanismes neurobiologiques qui sont à la base de la cognition (perception, motricité, langage, raisonnement, émotions...).

tenir compte d'autres aspects comme la différence entre les sexes, l'émotion, les mécanismes neuromodulateurs (abordés dans le [Chapitre de C.-Y. Guezennec](#)), etc.

1 La simplicité dans le sport : l'étude des mouvements

Qu'est-ce que la simplicité dans l'étude des mouvements ? Pour comprendre les mouvements complexes, il ne suffit pas de les décrire, il faut aussi découvrir les grands principes de l'organisation neuronale qui nous permettent de les réaliser. On en a découvert un très grand nombre dont les principaux sont reportés sur la liste de l'[Encart : « Quelques principes de la simplicité dans le contrôle et la perception du mouvement »](#). Nous allons en décrire quelques exemples que

l'on trouvera développés dans le livre *La simplicité* (voir bibliographie « Pour en savoir plus »).

1.1. Les principes simplificateurs de la marche

1.1.1. La marche : un mécanisme très complexe

La simple marche ([Figure 1](#)) est un mécanisme complexe et hiérarchisé ([Figure 2](#)) : dans la moelle épinière se trouvent des générateurs de rythme qui peuvent être organisés pour donner la course, le pas. La rétículo-mésencéphalique initie l'un ou l'autre de ces types de mouvements par le biais de mécanismes qu'ils contrôlent. Le tout est sous contrôle du cerveau, avec la coordination du cervelet et des ganglions de la base, qui vont sélectionner et, éventuellement, prendre des décisions sur la marche, la course, etc. Puis, il

QUELQUES PRINCIPES DE LA SIMPLICITÉ DANS LE CONTRÔLE ET LA PERCEPTION DU MOUVEMENT

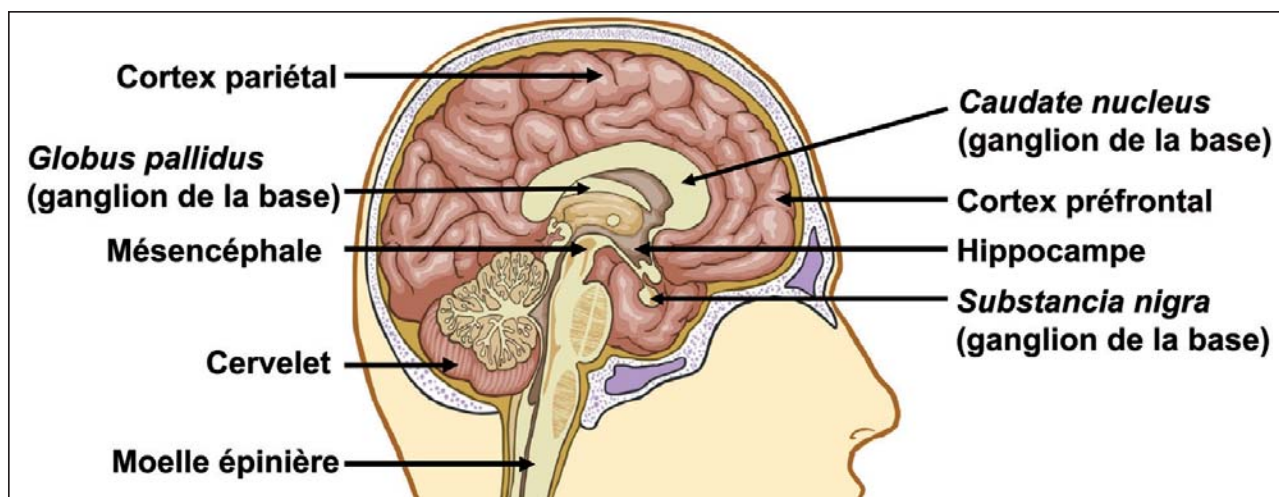
- 1- Un répertoire de sous-systèmes d'actions. La redondance et la vicariance*.
 - 2- Anticipation et prédiction par simulation du mouvement sur des modèles internes.
 - 3- Sélection des capteurs sensoriels en fonction de l'action. Caractère projectif de la perception.
 - 4- Réduction du nombre de degrés de liberté.
 - 5- Constitution de référentiels multiples et mobiles. Utilisation de plusieurs géométries.
 - 6- Mécanismes de cohérence.
 - 7- Rôle des neuromodulateurs (dopamine, etc.) et de l'émotion.
 - 8- Nature fondamentalement probabiliste de la perception et des mécanismes de décision.
- Etc.

*Vicariance : du latin *vicarius* = remplaçant. C'est la propriété qui permet aux organismes vivants d'effectuer la même tâche en utilisant des mécanismes différents. Ce concept a été utilisé par les psychologues pour indiquer qu'une même performance humaine ou animale peut être réalisée par le cerveau par plusieurs processus différents. La redondance, qui est un des aspects de la vicariance, désigne la mise en jeu de plusieurs mécanismes en parallèle.



Figure 1

La marche est un ensemble de mécanismes très compliqués dans lesquels interviennent à la fois des facteurs cognitifs et sensorimoteurs. L'évolution a mis au point une hiérarchie de processus qui diminuent cette complexité en divisant les tâches en modules spécialisés et coordonnés. C'est un aspect important de la simplicité.



y a la relation avec le système cérébral de traitement de l'espace : le cortex pariétal (qui évalue les différentes données comme la position du corps et de la cible dans l'espace grâce aux informations qu'il reçoit) et l'hippocampe (qui joue un rôle important dans la mémoire déclarative, la navigation spatiale et l'orientation dans l'espace). Ces deux parties du cerveau sont, quant à elles, sous contrôle du cortex préfrontal, qui prend les décisions. La marche est donc un ensemble de mécanismes très compliqués dans lesquels interviennent à la fois des facteurs cognitifs et senso-

rimoteurs. Mais ce n'est pas tout, il faut aussi prendre en compte la part d'émotions, qui est encore assez peu étudiée... Toutefois, cette « division du travail » en quelque sorte est un aspect important de la « simplicité ».

1.1.2. La création de référentiels mobiles : un principe simplificateur

Le premier exemple de principe simplificateur est la création de référentiels mobiles. La **Figure 3** représente les images successives et superposées d'une personne qui court par le photographe

Figure 2

Lorsqu'on marche, différentes régions du système nerveux se mettent en activité : la moelle épinière génère le rythme de la course et organise les patterns nécessaires pour passer de la marche à la course au saut etc., le mésencéphale initie le mouvement en utilisant la coordination du cervelet, des opérations de sélection par les ganglions de la base. Le cortex pariétal et l'hippocampe codent les aspects spatiaux de la trajectoire de la marche. Le cortex préfrontal prend les décisions, etc.

Figure 3

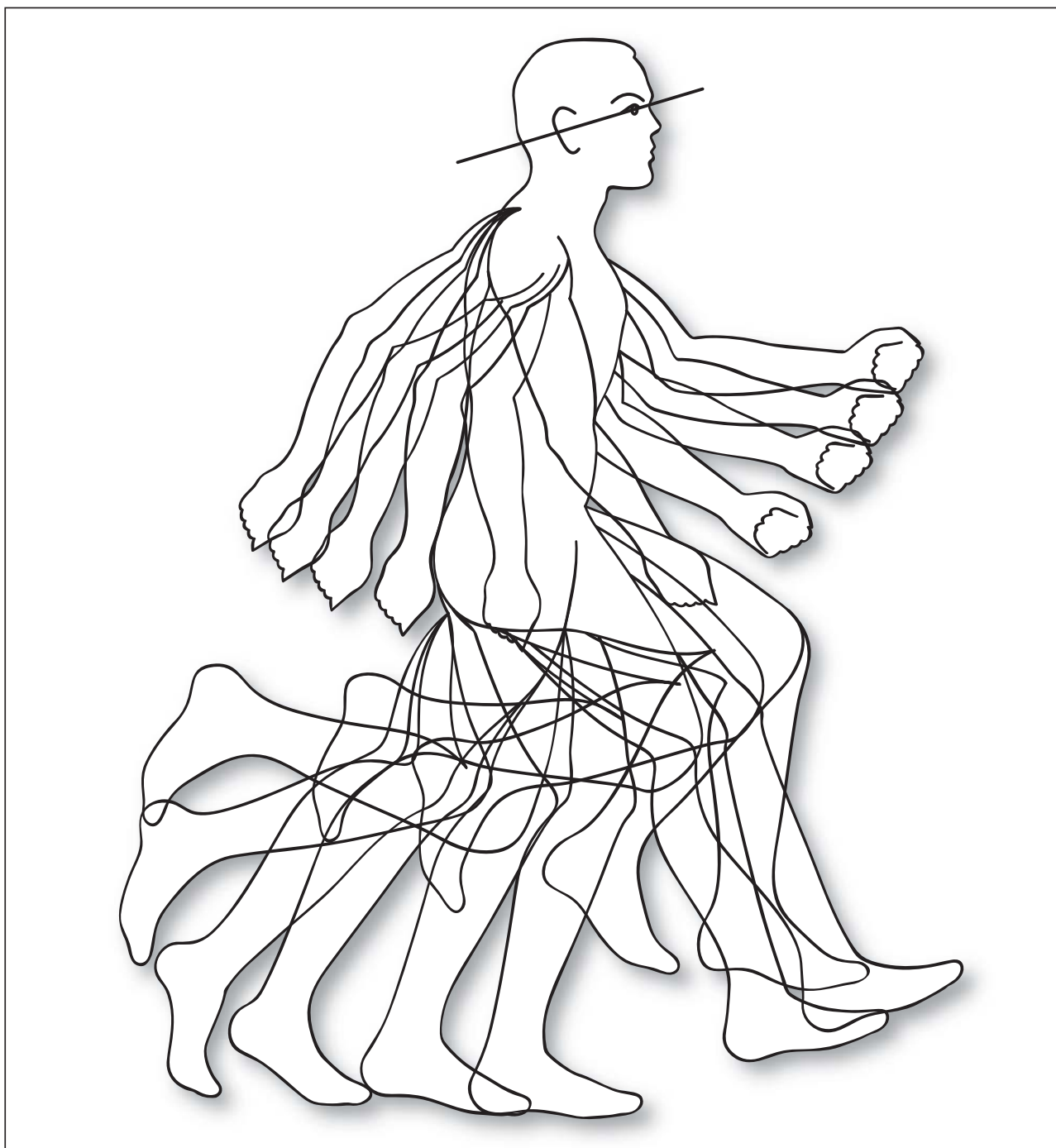
Reconstitution d'un homme courant, en conservant un point fixe des images. L'analyse de cette image de Muybridge nous montre que la tête reste fixe et que nous courons en prenant comme référentiel non pas les pieds, mais la tête [1]. Cette création d'un référentiel mobile simplifie considérablement le contrôle de la marche en permettant au marcheur de s'affranchir des aléas du sol par exemple.

américain Edward Muybridge (1830-1904).

L'analyse des images de Muybridge nous montre que la tête reste fixe et que nous courons en prenant comme référentiel non pas les pieds, mais la tête. Des études semblables ont montré que tous les mouvements du corps, complexes et rapides, comme ceux du ski sur bosses ou

ceux du surf (**Figure 4**), qui nécessitent la coordination de centaines de degrés de liberté, sont assurés à partir non pas des pieds, comme c'est le cas pour l'enfant jusqu'à deux-trois ans (voir aussi le paragraphe 1.4.2 et la **Figure 11A**), mais à partir d'une centrale inertielle mobile qui est la tête.

Une sorte de révolution galiléenne s'est donc produite au





cours de l'évolution qui nous a conduits à coordonner ainsi nos mouvements. Tout cela a été étudié quantitativement grâce à des calculs effectués sur ordinateur.

Des images ont été obtenues par enregistrement de la marche d'un sujet par une méthode de capture de mouvement avec des caméras digitales et un ordinateur [2]. Quand on examine ces mouvements dans le détail, on s'aperçoit que la tête est parfaitement stabilisée en rotation (comme schématisé sur la [Figure 3](#)) et que cela reste vrai pour les différents types de mouvements. Nous avons publié de nombreux travaux sur ces questions. Les roboticiens, en particuliers ceux qui construisent des humanoïdes, ont mis longtemps à admettre ce principe simplificateur qu'ils appliquent maintenant.

Dans ce travail que nous avons réalisé en 1990 et 1991, nous avons montré que la marche est contrôlée à partir de la tête, qui est stabilisée grâce au système vestibulaire³ et au regard. Ce principe simplificateur est un exemple de simplicité.

Il n'était pas évident d'inventer l'idée d'un référentiel mobile. Actuellement, en collaboration avec des mathématiciens, nous essayons de comprendre ce principe en faisant appel aux mathématiques d'Élie Cartan⁴.

3. Le système vestibulaire est le système sensoriel principal de la perception du mouvement et de l'orientation par rapport à la verticale. Il est donc à la base du sens de l'équilibre.

4. Élie Cartan (1869-1951) est l'un des mathématiciens français les plus influents de son époque et un théoricien de talent. Son travail a porté sur les applications géométriques des groupes et algèbres de Lie ; il a établi une classification de ces dernières sur le corps des nombres complexes ; il a introduit la notion de spineur, vecteur complexe qui permet d'exprimer les rotations de l'espace par une représentation bidimensionnelle et qui a contribué à affiner certains outils mathématiques de la relativité générale.

Figure 4

Dans des sports comme le ski sur bosses ou le surf, tous les mouvements du corps, complexes et rapides, qui nécessitent la coordination de centaines de degrés de liberté sur des supports inégaux ou mouvants, sont assurés non pas à partir des pieds, mais à partir de la tête.

1.2. Les principes simplificateurs des mouvements de la main

Un autre exemple concerne les mouvements de la main. L'étude neurophysiologique et biomécanique de ces mouvements a permis de découvrir toute une série de lois simplificatrices (**Encart : « Les lois de la formation de trajectoires : communes à la main et à la marche ? »**). Tout d'abord, le fait que le cerveau ne contrôle pas chacun des muscles mais, éventuellement, un point d'équilibre entre les muscles.

LES LOIS DE LA FORMATION DE TRAJECTOIRES : COMMUNES À LA MAIN ET À LA MARCHÉ ?

- Point d'équilibre (paragraphe 1.2).
- Variation coplanaire (paragraphe 1.3.1).
- Loi de la puissance 1/3 (paragraphe 1.3.2).
- Variables composites.
- Contrôle séparé de la distance et de la direction.
- Etc.

Une autre découverte importante est la raison pour laquelle le cerveau n'a pas à contrôler chacun des muscles impliqués dans le mouvement. C'est parce qu'il existe des relations mécaniques très simples entre les angles d'élévation des différents segments, ce qui permet de simplifier le contrôle cérébral.

Nous avons également étudié la question de savoir si ces lois simplificatrices du fonc-

tionnement du cerveau pour contrôler les mouvements de la main pouvaient aussi s'appliquer pour la locomotion. Autrement dit, notre cerveau contrôle-t-il, avec des principes très généraux, l'ensemble des mouvements quelque soit leur complexité, que ce soit une vingtaine de degrés de liberté ou des centaines, quand il s'agit de contrôler la locomotion ? Cette idée est présente dans la littérature de physiologie depuis longtemps sous le nom de « principe d'équivalence motrice ». Par exemple, on peut écrire une lettre A avec le doigt, la main, la langue, le pied ou en courant sur la plage !

1.3. Les lois simplificatrices de contrôle de la globalité des mouvements

1.3.1. La variation coplanaire

Plusieurs équipes de recherche ont réalisé des images successives de la marche [3,4]. Bien que la vision d'ensemble apparaisse très complexe, une équipe italienne a montré que les trois angles d'élévation de la cheville, de la jambe et de la cuisse, lorsqu'ils sont portés sur un diagramme, décrivent une trajectoire plane (comme cela est montré sur la **Figure 5**). Cela signifie donc qu'ils peuvent être décrits par une loi ; il en est de même pour le bras. Le cerveau peut donc se contenter de ne contrôler que quelques grandes variables.

Il semble donc bien qu'au cours de l'évolution, des moyens ont été recherchés et trouvés permettant de

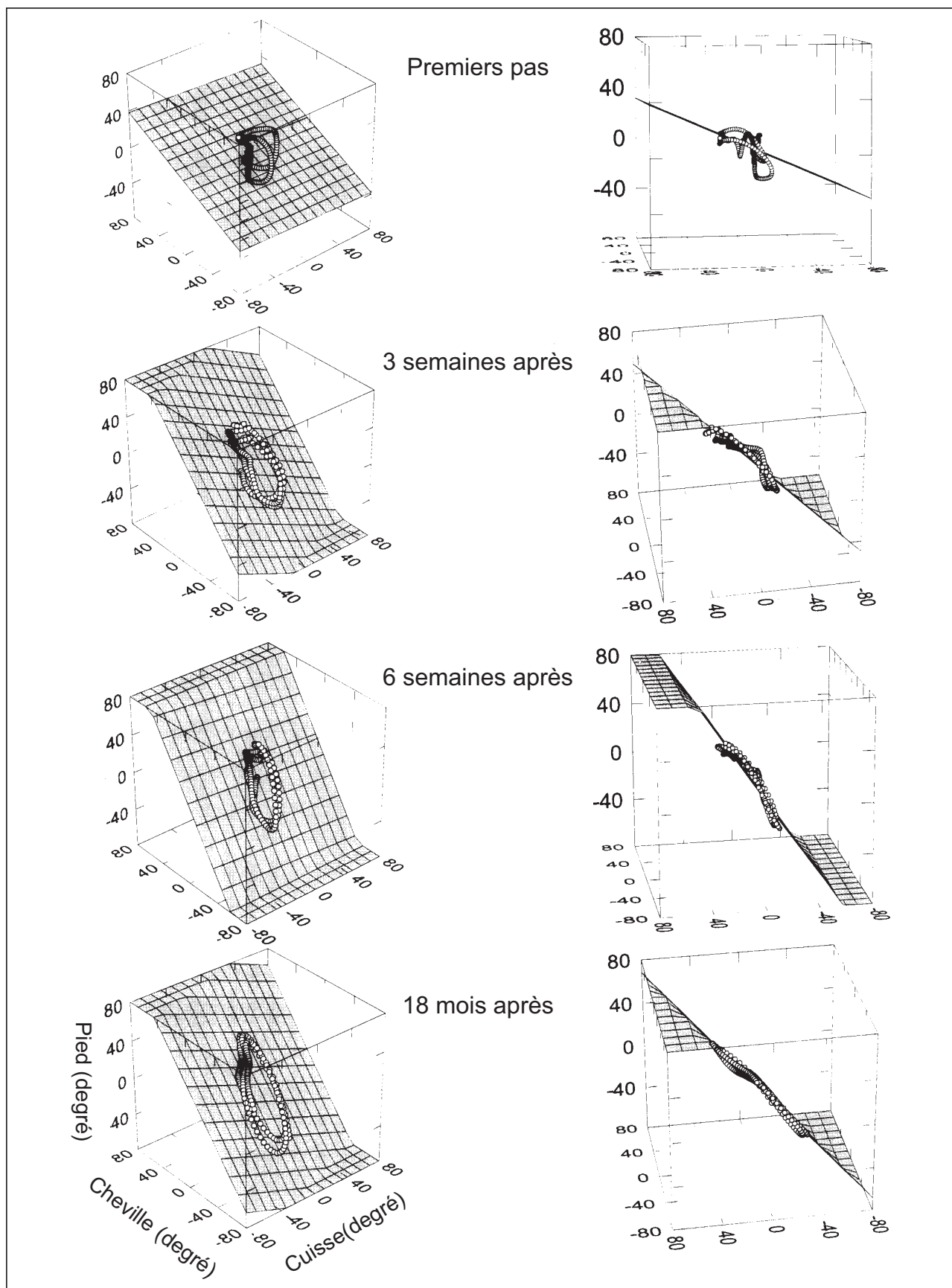


Figure 5

En visualisant des images successives de la marche, on constate que les trois angles d'élévation de la cheville, de la jambe et de la cuisse décrivent une trajectoire plane ! Cette coordination apparaît au cours de l'enfance. Les graphiques montrent le diagramme liant les trois angles lors des premiers pas, puis 3 et 6 semaines plus tard, puis 18 mois après [4].

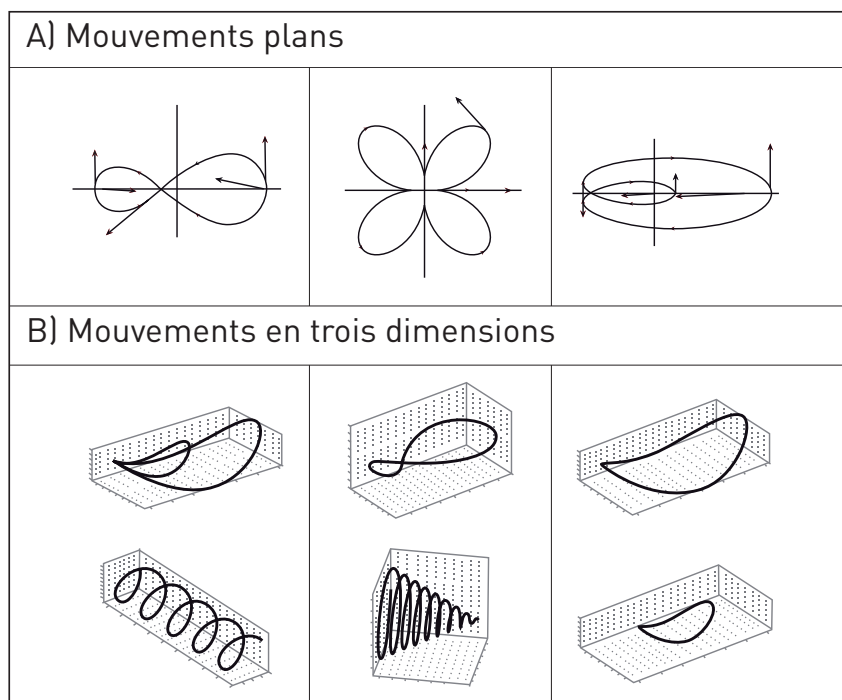


Figure 6

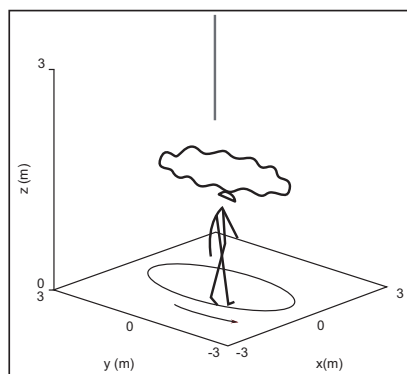
Lorsque l'on effectue un mouvement en forme de huit, de trèfle ou d'ellipse, il existe une relation linéaire entre la vitesse tangentielle (vitesse le long de la trajectoire) et la courbure de la trajectoire. Plus la courbure est importante, plus l'on va lentement.

A) Tracés de mouvements plans.

B) Mouvements en trois dimensions. Ici, la relation tient compte de la torsion du mouvement, en plus de sa courbure.

Figure 7

La loi liant vitesse tangentielle et courbure des mouvements de la main est valable pour la génération de trajectoires locomotrices. Un sujet marche suivant une trajectoire elliptique et l'on mesure le mouvement de la tête dans le plan horizontal. On trace alors un diagramme liant le logarithme de la courbure de la trajectoire et le logarithme de la vitesse tangentielle de la tête le long de la trajectoire : on obtient une relation linéaire qui prouve que la relation de la puissance $1/3$, valable pour la main, l'est aussi pour la génération de trajectoires locomotrices.



contrôler nos mouvements dans leur globalité plutôt que dans le détail du mouvement de chaque muscle. Cette capacité de coordination est innée et se développe au cours de l'enfance.

1.3.2. La loi de la puissance $1/3$

Qu'est-ce que la loi de la puissance $1/3$? C'est la relation entre la vitesse tangentielle, la courbure et la torsion de

la trajectoire [5a] : si l'on demande à un sujet de réaliser un mouvement en forme de huit, en forme de trèfle, ou encore un mouvement elliptique (Figure 6A), il existe une relation linéaire entre la vitesse tangentielle (c'est-à-dire la vitesse le long de la trajectoire) et la courbure. Autrement dit, je vais plus lentement quand la courbure est importante. De même, de façon plus générale, car nos mouvements ne sont pas plans, nous avons récemment montré qu'une loi linéaire semblable, incluant un facteur lié à la torsion, caractérise les mouvements de torsion de la main (Figure 6B) [5b].

Nos collègues mathématiciens et physiciens ont montré que cette loi du mouvement de torsion dérive en fait des principes généraux de minimisation d'énergie, et même de principes encore plus généraux dans des géométries qui ne sont pas nécessairement euclidiennes⁵. D'une façon générale, on peut maintenant penser que ces principes sont à la base de certaines de ces règles simplificatrices de description des mouvements.

Ces lois sont-elles valables pour les trajectoires locomotrices ? Nous avons pu observer que cette loi simplificatrice est aussi vraie pour

5. La géométrie traditionnelle développée par Euclide modélise, en physique classique, l'espace qui nous entoure, un espace à trois dimensions gouverné par un ensemble d'axiomes et postulats. Il existe des espaces dits non euclidiens, où ces axiomes et postulats ne sont pas toujours valables. C'est le cas de la géométrie sphérique.

décrire la marche le long d'une ellipse. En mesurant le mouvement de la tête du sujet, on retrouve la même relation linéaire que celle observée pour les mouvements du bras (Figure 7, [6]), ce qui suggère l'existence d'un principe simplificateur plus général, valable aussi bien pour la génération du mouvement de la main que pour la génération de trajectoires, et cela parce que marcher c'est aller quelque part, et non pas seulement agiter les jambes !

1.3.3. Les trajectoires locomotrices sont stéréotypées

Que se passe-t-il quand on fait marcher quelqu'un dans une pièce, sur une trajectoire libre mais avec une contrainte d'orientation comme par exemple passer par une porte ? *A priori*, on peut le faire de multiples façons. En réalité, quand on demande à un sujet, sans rien lui préciser, de faire cette expérience, on s'aperçoit que ses trajectoires sont complètement stéréotypées et répondent effectivement à des principes généraux. Ces études sont réalisées en collaboration avec des collègues roboticiens et mathématiciens. Nous en décrivons quelques propriétés dans les lignes qui suivent.

1.4. Comment étudier les formes générales associées aux gestes ?

1.4.1. La segmentation du mouvement

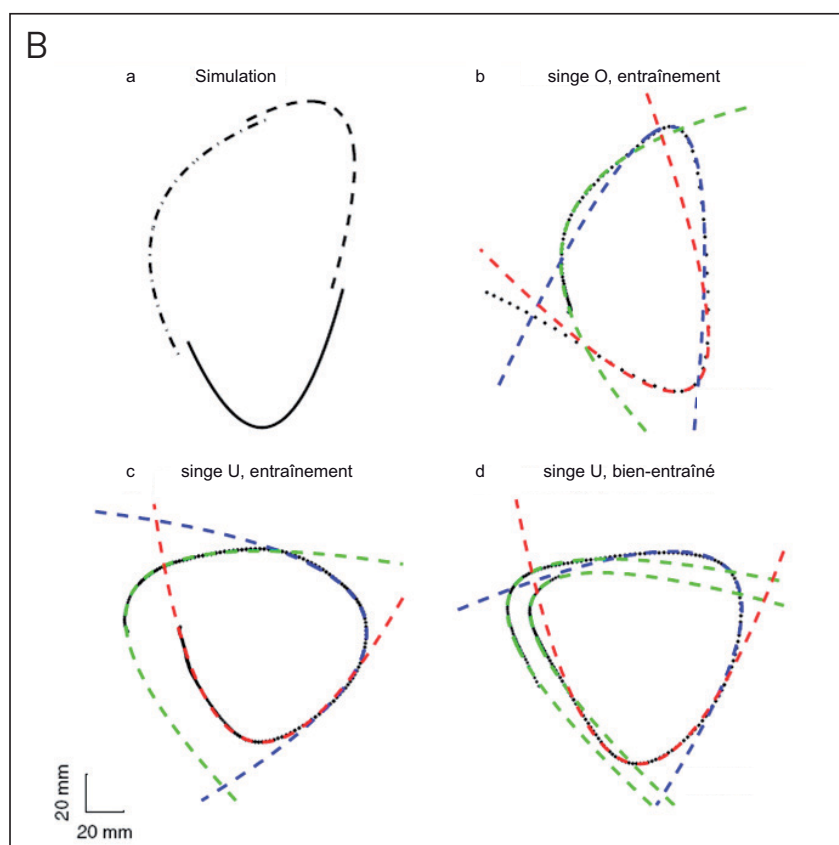
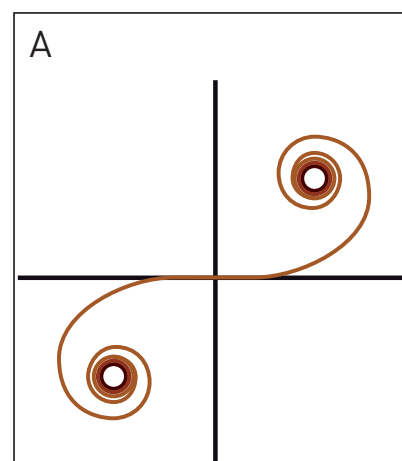
Nous avons étudié de nombreuses trajectoires pour savoir si elles sont ou non liées à des formes géométriques assez simples. Pour

certains comme le roboticien Jean-Paul Laumond, ce sont des morceaux de clothoïdes (doubles spirales, dites spirales de Cornu, Figure 8A). Pour d'autres collègues neurophysiologistes et roboticiens qui ont enregistré les relations entre l'activité des neurones du cerveau et les mouvements de la main du singe, ce sont des segments de parabole (Figure 8B).

Quoi qu'il en soit, il semble cependant qu'il existe des mouvements simplificateurs permettant de décrire d'une façon générale ces trajectoires et qu'ils sont peut-être à la base de notre perception de l'esthétique. L'exemple suivant, tout à fait remarquable, le confirme : si l'expérimentateur déplace un doigt et vous demande s'il bouge à vitesse constante, vous ne le percevrez bien à vitesse constante que si le mouvement l'est non

Figure 8

La forme du geste est-elle composée de segments de clothoïdes (A) ou de paraboles (B) ?
A) Schéma de clothoïde obtenu à partir de modèles de la marche par des roboticiens [7a].
B) Enregistrements de mouvements de la main chez le singe qui sont décomposés en segments de parabole [7b].



seulement, mais également respecte cette loi simplificatrice. Les mêmes lois sous-tendent, donc, à la fois l'exécution motrice et la perception. Ces observations introduisent, de plus, le rôle de l'imagerie mentale, que nous abordons dans le paragraphe 1.5.

Peut-être que dans cette calligraphie, représentée sur la **Figure 9A**, ou dans le geste de cette sculpture (**Figure 9B**), on retrouve ces principes simplificateurs qui évoquent dans votre cerveau un mouvement ? Il a été montré par le professeur Semir Zeki (professeur de neuroesthétique à Londres) que lorsqu'on regarde ces images, on active dans notre cerveau non seulement les aires des émotions mais aussi les aires qui sous-tendent la perception des mouvements.

1.4.2. L'anticipation : le rôle du regard et du cerveau

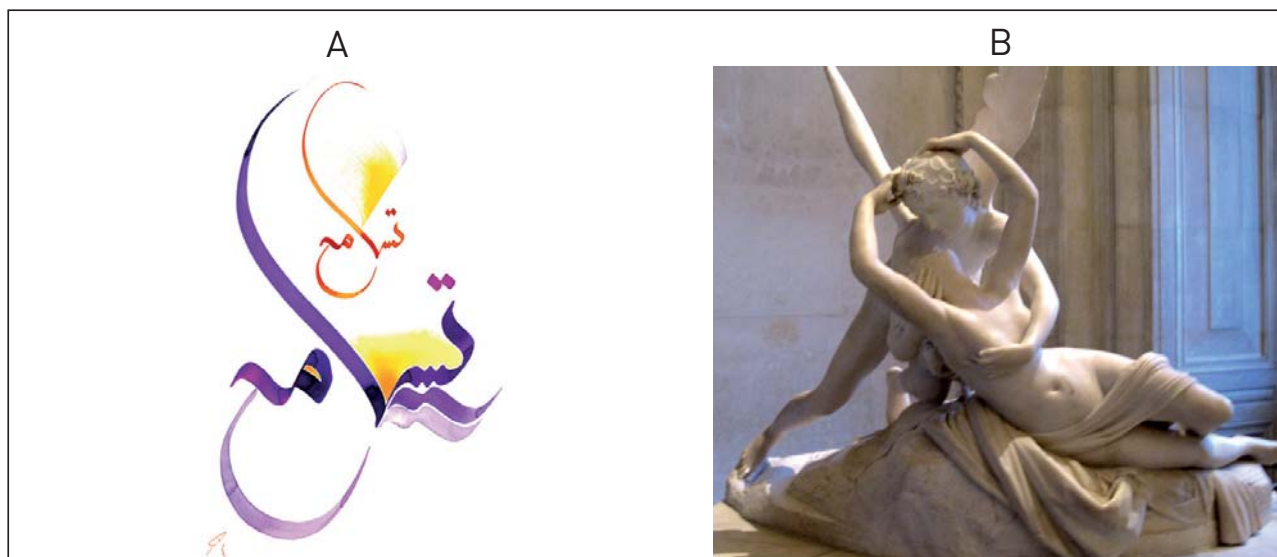
L'anticipation est un autre principe simplificateur important, outil de la simplicité. En effet, le cerveau est essentiellement une machine à anticiper le futur à partir de la

mémoire des conséquences des actions passées (ce lien entre passé, présent et futur est actuellement formalisé par des modèles probabilistes « bayésiens »). Nous avons montré, par exemple, que lorsqu'on tourne à un coin en marchant, comme illustré sur la **Figure 10**, ce ne sont pas les pieds qui commandent la trajectoire, mais d'abord le regard, puis la tête, puis les pieds. Autrement dit, on retrouve ici le principe d'un guidage de l'ensemble des mouvements du corps par la tête, avec un rôle important du regard : le regard est utilisé en premier, la tête ensuite, pour guider le corps [8]. Ce guidage « top-down » est, d'après moi, un principe simplexe.

Les applications de cette loi sont très importantes. En effet, une grande partie de la pathologie motrice, chez l'enfant en particulier, mais aussi chez l'adulte, et même dans les grandes maladies neurologiques, est souvent étudiée comme une pathologie musculaire, alors qu'en réalité, elle peut être liée à une pathologie d'origine cognitive, liée aux

Figure 9

Dans le geste du calligraphe (A) ou de cette magnifique sculpture (B), retrouve-t-on les mêmes principes simplificateurs ?



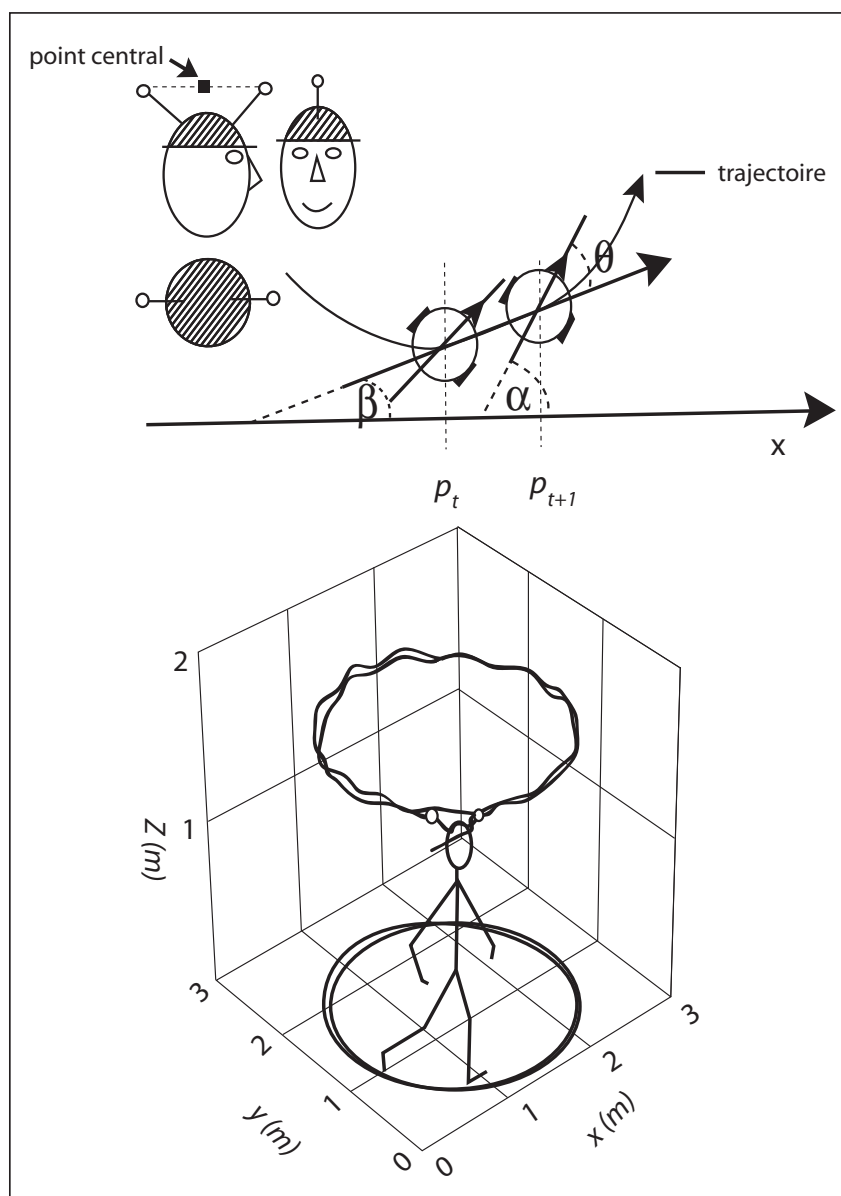


Figure 10

L'anticipation est un autre outil de la simplicité. Les enregistrements de la direction de la tête pendant une marche en cercle, en tournant à un coin, ou dans tous les mouvements de la marche normale, montrent que la tête anticipe la trajectoire. En fait, c'est le regard qui anticipe la tête et la tête qui anticipe le corps.

mécanismes de guidage généraux de la coordination du mouvement, y compris le rôle du regard qui guide la trajectoire. Cette anticipation du mouvement par le regard apparaît au cours de l'enfance, au cours du développement : quand un enfant de trois ans et demi tourne à un coin, la tête part en dernier, alors qu'à cinq ans, la tête part d'abord ; et cette observation est générale (Figure 11). Ces études ont été réalisées dans un grand hôpital de Pise où l'on pratique à la fois psychia-

trie et neurologie sur des enfants souffrant d'infirmités motrices cérébrales, et où l'on expérimente de nouvelles méthodes de réhabilitation.

1.4.3. La simulation de l'action avant l'exécution : un autre outil de la simplicité

Le fonctionnement du cerveau cognitif utilise des « modèles internes » pour simuler l'action avant l'exécution. Autrement dit, l'apprentissage, la réhabilitation, ne concernent pas seulement les muscles mais ces modèles internes



Figure 11

A) L'anticipation de la marche par le regard apparaît au cours de l'enfance : quand un enfant de trois ans et demi tourne à un coin, la tête tourne en dernier, alors qu'à cinq ans, c'est le regard et la tête qui tournent d'abord et guident la trajectoire. Tout déficit dans ce guidage peut induire des troubles de la marche. B) Pendant les compétitions sportives, les joueurs trompent leur adversaire en regardant ailleurs que là où ils ont l'intention de tourner. Cette anticipation est aussi valable dans le cas d'un lancer de balle, ou d'un penalty au football par exemple : le regard guide en anticipant le mouvement, et l'on peut tromper l'adversaire en regardant ailleurs !

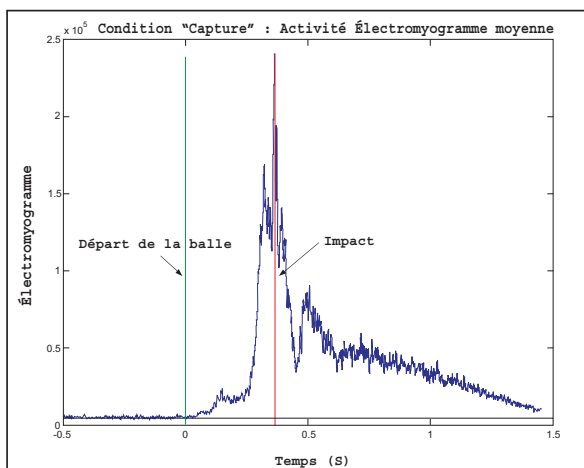
également. Par exemple, si l'on fait tomber une balle lourde dans une main, la main qui la rattrape ne descend pas : quel que soit le poids de cette balle, la main reste parfaitement stable, ce qui signifie que, juste avant que la balle ne touche la main, le cerveau induit une activité dans le muscle qui est exactement égale à ce qu'il faut produire pour compenser

la force d'impact. C'est ce qui est montré dans la [Figure 12](#) de l'électromyographie⁶ du muscle biceps en fonction du temps. Le cerveau a anticipé quelle va être la force d'impact [9] !

6. Enregistrement des courants électriques qui accompagnent l'activité musculaire.

Figure 12

Lorsqu'une balle lancée en l'air retombe dans la main, celle-ci reste parfaitement stable, car le cerveau a induit une activité dans le muscle compensant exactement la force d'impact avant le contact. Ceci est possible car le cerveau dispose de « modèles internes » des lois de Newton qui lui permettent de prévoir la force de l'impact et de transmettre au muscle la commande adaptée. Cette capacité est liée à l'entraînement et, chez l'enfant, aux jeux de la petite enfance [9].



Nous avons même réalisé des expériences à bord de stations spatiales où l'on peut faire tomber une balle d'un lanceur de balles dans la main d'un cosmonaute (**Figure 13**). Dans l'espace la balle tombe à vitesse constante, puisqu'on est en apesanteur et que l'accélération de Newton (c'est-à-dire avec une constante de pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ne s'applique pas. Et pourtant, le sujet produit, comme sur Terre, ce même mouvement anticipateur [10]. Ces mouvements anticipateurs sont donc inscrits définitivement dans le fonctionnement du cerveau et nous permettent de ne pas tomber, de prévoir une chute ou un mouvement, etc.

Tout cela montre à quel point le cerveau est une machine biologique qui simule la réalité grâce à des représentations mentales de celle-ci, tout comme nous avons le rêve qui simule le monde. Donc, en parallèle avec le fonctionnement sensorimoteur, au cours de l'évolution, se sont développés des mécanismes de simulation mentale du mouvement.

1.5. L'imagerie mentale : les mêmes structures cérébrales sont impliquées dans l'exécution, l'observation et la simulation mentale d'une action

Aujourd'hui, la simulation mentale, l'imagerie mentale et l'imagerie motrice sont utilisées pour la réhabilitation des patients. Les mécanismes à la fois neurochimiques et neurophysiologiques de cette simulation mentale font l'objet de nombreuses études. Il y a quelques années, le

médecin biologiste italien Giacomo Rizzolatti enregistrait le bruit associé à l'activité des neurones du cortex prémoteur d'un singe, zone cérébrale contrôlant les mouvements de la main. Chaque fois que le singe allait manger une cacahouète, ses neurones s'activaient. Puis l'expérimentateur, qui a sans doute eu faim, a lui-même pris une cacahouète et la même activité émanant du même neurone a été enregistrée, preuve que les neurones du singe avaient encore été activés même s'il n'avait pas lui-même pris la cacahouète !

Cette expérience montre que les neurones, qu'on pensait être prémoteurs, sont en réalité des neurones qui codent « l'action », qu'elle soit produite par le sujet ou par autrui. Lorsque l'on exécute un geste, ou que l'on observe un geste, des neurones du cerveau sont activés. Les mêmes structures cérébrales sont impliquées dans l'observation et dans l'exécution d'une action. Quel beau principe « simplexe » qui nous permet de comprendre l'action d'autrui ! L'activation du « système miroir », un réseau d'aires qui ont cette capacité de « résonance », est d'autant plus grand que nous sommes familiers avec l'action ou que nous avons pratiqué la même action. Un joueur de rugby ou un sportif qui est familier avec le jeu qu'il voit à la télévision, ou sur le stade, aura l'impression qu'il joue lui-même, ou fait le geste, beaucoup plus qu'un amateur.

Plus tard, Julie Grèzes et Jean Decety, chercheurs en neurosciences cognitives, ont réalisé des expériences



Figure 13

Alors qu'on se trouve en apesanteur, les réflexes que nous avons sur Terre sont maintenus : le cerveau de ce cosmonaute anticipe le mouvement de la balle comme si elle allait tomber !

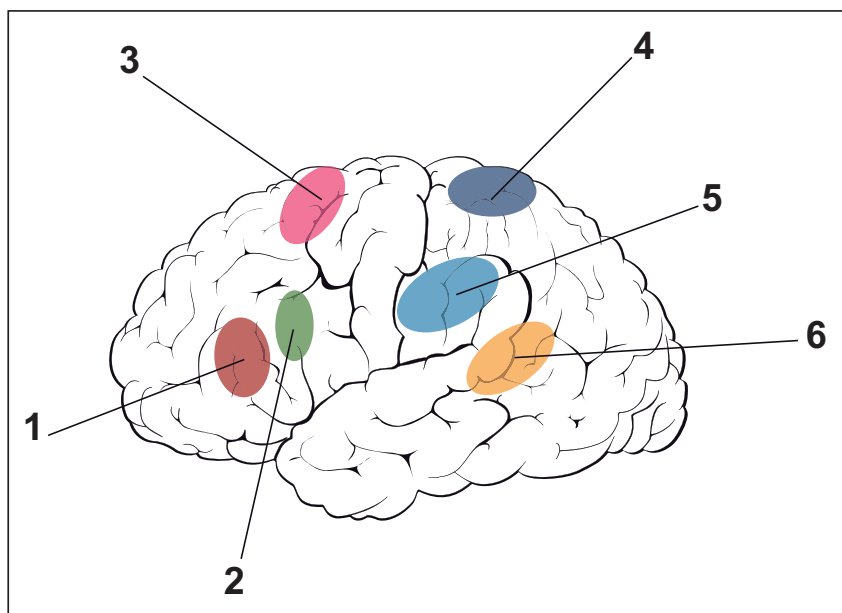


Figure 14

Le système miroir : les mêmes aires cérébrales sont impliquées dans l'observation et l'exécution d'une action et dans leur simulation mentale.

1 : cortex ventral prémoteur (neurones miroirs), 2 : pars triangularis, pars opercularis du gyrus frontal inférieur, 3 : cortex dorsal prémoteur, 4 : lobe pariétal supérieur, 5 : cortex pariétal inférieur, 6 : sulcus temporal supérieur postérieur.

Figure 15

Les aires activées pendant l'imagerie motrice sont différentes entre droitiers et gauchers. L'imagerie motrice n'est donc pas abstraite mais incarnée dans les mécanismes de l'exécution [11].

similaires avec l'homme qui ont confirmé les observations faites avec le singe. Ces mêmes aires cérébrales, qui sont impliquées dans l'observation et dans l'exécution d'une action, permettent donc aussi de simuler mentalement une action sans l'exécuter : elles constituent ce que l'on appelle le « système miroir ». La **Figure 14** représente les différentes aires du cerveau impliquées dans ce système.

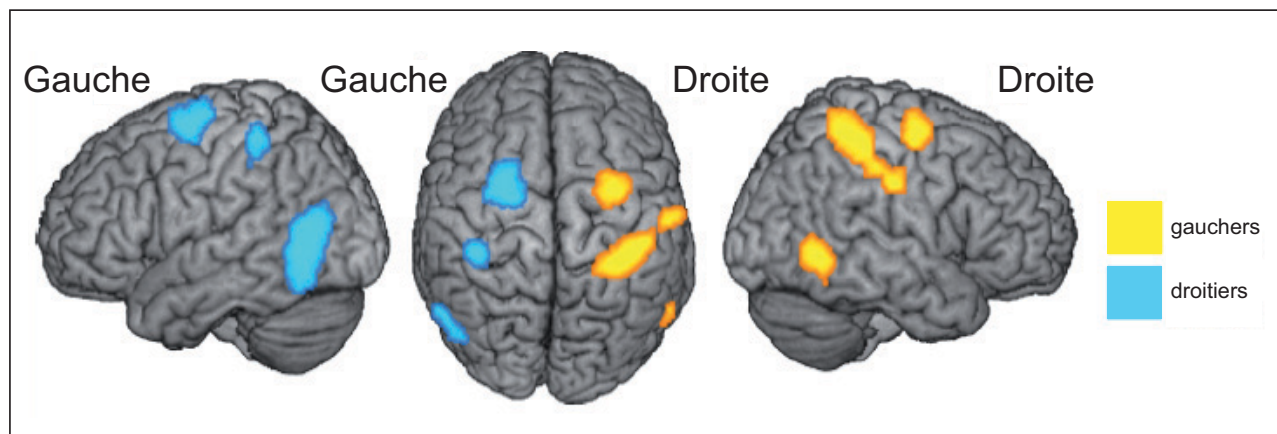
Une partie de notre capacité à simuler une action sans l'exécuter a donc une base neuronale. Ce système miroir n'est cependant pas le seul qui intervient pour l'exé-

tion d'une même action ; par exemple, les aires activées dans le cerveau sont différentes chez un droitier et un gaucher (**Figure 15**). Cette très grande découverte est aussi actuellement utilisée pour comprendre des maladies et troubles du fonctionnement perceptivo-moteur. Il faut toutefois prendre garde à ne pas attribuer trop de propriétés à un seul système neuronal.

L'imagerie motrice n'est donc pas abstraite mais est incarnée dans les mécanismes de l'exécution. Il y a encore là tout un champ d'investigation scientifique important sur l'imagination du mouvement, la simulation mentale du mouvement, et il n'existe que très peu d'études concernant les mécanismes neuropharmacologiques de cette simulation.

1.6. La marche imaginée : un outil d'entraînement sportif ?

La marche imaginée peut servir à l'entraînement des sportifs. On sait même qu'elle est utilisée avant certaines épreuves, pour l'escalade par exemple, où les sportifs ont le droit d'imaginer l'épreuve pendant cinq minutes.



La simulation mentale du mouvement est donc un outil bien connu du monde sportif, et l'on possède des données récentes sur la marche imaginée ou les parcours fictifs. Nous savons depuis un certain nombre d'années qu'il existe une forme d'isochronie entre la marche imaginée et la marche réelle, c'est-à-dire que l'on met à peu près le même temps pour réaliser un parcours fictif ou un parcours réel. Ce résultat a été obtenu par différentes équipes de chercheurs, mais nous ne connaissons pas encore les bases neuronales de cette imagination qui intègre le temps.

La **Figure 16**, extraite d'une très récente étude par des neurologues de Munich, montre qu'à quelques différences près, les mêmes aires cérébrales sont activées par

la marche réelle et la marche imaginée. Ce magnifique travail de neurosciences a nécessité la réunion d'un très gros équipement matériel dans le même institut, combinant l'imagerie cérébrale par résonance magnétique et l'imagerie cérébrale en TEP (Tomographie par émission de positons. **Encart : « L'imagerie fonctionnelle, ou comment voir l'activité d'un organe »**), dans des conditions difficiles sur des personnes qu'il faut faire marcher dans un couloir pendant une heure. C'est un bel exemple de l'indispensable coopération entre neurologues, psychologues, neurophysiologistes, entre autres.

1.7. Comment fonctionne l'imagerie mentale ?

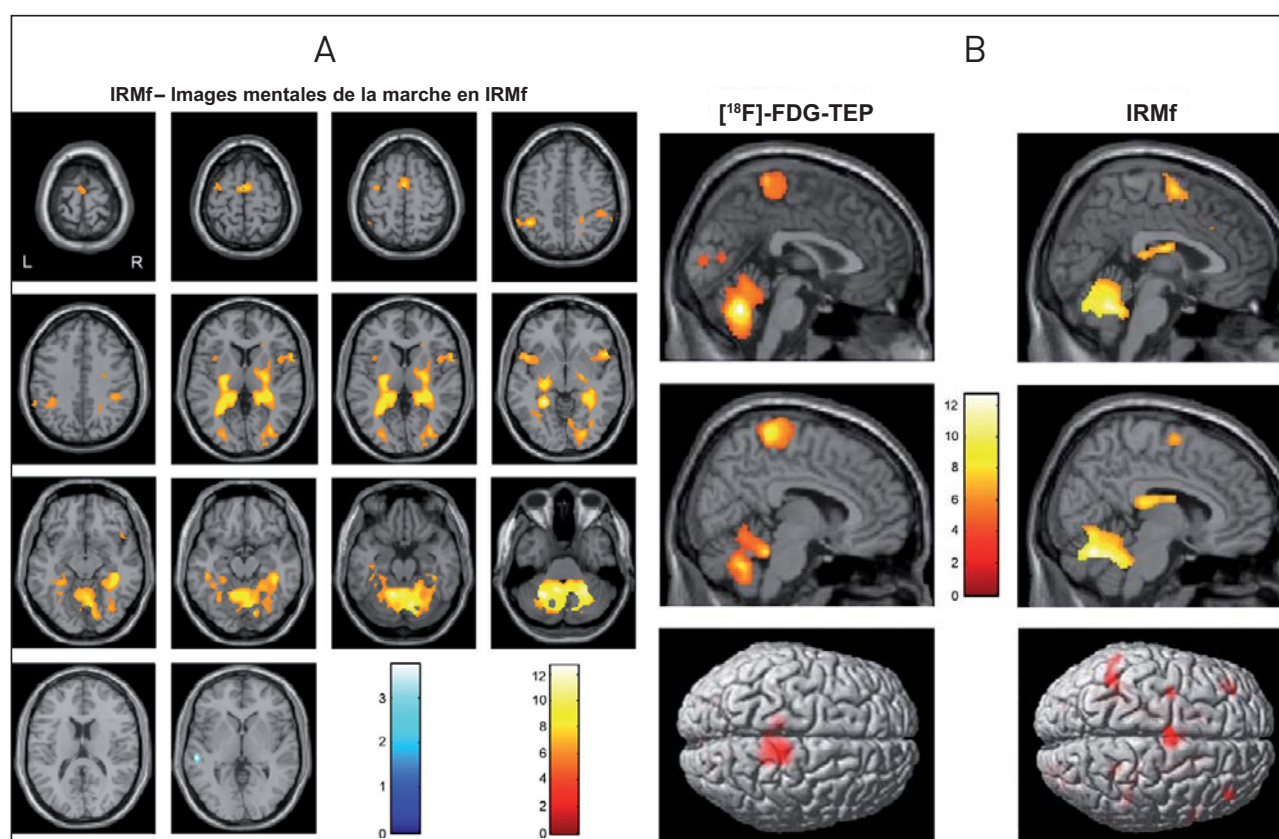
La **Figure 17** montre que les neurones de l'hippocampe sont activés pendant la station

Figure 16

Une grande partie des mêmes aires du cerveau est activée par la marche réelle et la marche imaginée [12].

A) Pendant qu'un sujet s'imagine en train de marcher, les images d'IRM fonctionnelle montrent l'activation de certaines régions du cerveau par une augmentation du signal (en jaune, rouge), ou au contraire la désactivation par une diminution du signal (en bleu). Les principales régions avec augmentation des signaux sont : cortex préfrontal, noyau caudé, putamen, gyrus parahippocampique, fusiforme et lingual, precuneus, cuneus, vermis et lobule paramédian du cervelet, etc.

B) Images de TEP et d'IRMf réalisées pendant que le sujet marche. Les principales régions avec augmentation des signaux sont : gyrus précentral et post-central, gyrus parahippocampique, fusiforme et lingual, precuneus/cuneus et cervelet médian. Une diminution d'activité a aussi été observée dans certaines régions.



L'IMAGERIE FONCTIONNELLE, OU COMMENT VOIR L'ACTIVITÉ D'UN ORGANE

L'imagerie fonctionnelle permet de suivre le fonctionnement d'un organe pendant la réalisation d'une action physique (le sujet bouge la main) ou mentale (le sujet pense qu'il bouge la main), sans intervention extérieure traumatisante.

Les techniques associées, notamment celles qui traitent de la connaissance – ce qu'on appelle les sciences cognitives – ont révolutionné aussi bien la recherche biomédicale que le diagnostic de nombreuses pathologies, comme de cancers ou de diverses maladies neurologiques, et le suivi de l'effet d'une thérapie. Elles complètent les techniques d'imagerie structurale qui donnent des informations sur l'état de l'organe (tissu, cellule, etc.), non plus en activité, c'est-à-dire en mode dynamique, mais en mode statique.

Plusieurs techniques d'imagerie fonctionnelle sont actuellement utilisées. Les principales sont l'IRMf et la TEP :

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

L'IRMf procède des mêmes principes que la résonance magnétique nucléaire RMN, devenue un instrument d'analyse routinier en physique, chimie et biologie (sur l'IRM structurale, voir le chapitre de M. Port dans l'ouvrage *La chimie et la santé, au service de l'homme**). On demande au sujet de faire alternativement un geste donné puis de cesser et de se mettre au repos. On localise, par les techniques habituelles d'analyse, traitement et reconstitution d'images, quelles sont les régions du cerveau qui sont activées. Cela se fait par ce que l'on appelle l'effet BOLD (*Blood Oxygen Level Dependant*) : pendant l'activité et dans les zones activées, on observe une très petite augmentation de la consommation d'oxygène des globules rouges. Pour cela, on joue sur le paramagnétisme de l'hémoglobine qu'elles contiennent, selon qu'elle n'est pas ou est oxygénée. Dans le premier cas, elle est visible en RMN, dans le second elle ne l'est pas. C'est la variation, très faible, qui est mesurée, exigeant des méthodes très élaborées d'analyse et de traitement.

La tomographie par émission de positons (TEP)

La TEP est fondamentalement différente de l'IRMf, car elle utilise des traceurs radioactifs très particuliers, qui ont une durée de vie très courte et émettent des positons**, qu'on appelle parfois positrons car ils portent une charge positive, exactement inverse de celle portée par l'électron. La rencontre d'un électron et d'un positon produit une émission de rayonnement gamma, de très haute énergie, lequel va se désintégrer en deux photons qui partent dans des directions opposées. Leur localisation par une caméra spéciale permet de déterminer très précisément et avec une très grande sensibilité où s'est faite l'émission gamma. Il est alors possible de constater où et avec quelle intensité le cerveau effectue une tâche (voir la **Figure 16** par exemple). Par comparaison entre sujets sains et sujets malades, on peut ainsi déterminer quelles sont les zones actives, celles qui sont lésées et qui peuvent correspondre à des difficultés d'apprentissage ou d'élocution d'un sujet, ou détecter des pathologies mentales graves.

Les traceurs chimiques sont principalement l'atome de fluor-18, de durée de demi-vie de 110 minutes (c'est le fluor 19 qui est stable, non radioactif) ; il est préparé dans un accélérateur que l'on appelle cyclotron et on s'en sert pour préparer une molécule qui servira de marqueur et que l'on injecte dans l'organisme du sujet. Il s'agit très généralement (à 90 %) d'un dérivé du glucose, (le FDG ou 2 (18-F) fluoro-2-déoxy-D-glucose) qui sert de « combustible » au cerveau, comme à tous les organes d'ailleurs. D'autres radionucléides à courte durée de vie, comme l'oxygène 15 (c'est l'oxygène 18 qui est stable) ou le carbone 11 (c'est le carbone 13 qui est stable), commencent à être utilisés.

La préparation de ces éléments exige des conditions de sécurité importante ; il n'existe que sept sites en France où on peut les préparer. À côté du cyclotron, il est nécessaire d'avoir un

laboratoire de chimie très spécialisé. On doit y réaliser la synthèse de la molécule qui sera injectée au patient, par exemple le FDG évoqué plus haut. Cette synthèse, qui peut nécessiter plusieurs étapes, doit être choisie de manière à être très rapide (car le fluor 18 est peu stable), se faire dans un seul « pot » et sans manipulation externe, et aussi, sans qu'il faille séparer le FDG de produits « parasites », qu'on appelle en chimie, produits secondaires de réaction. Le chimiste doit donc mettre au point, une synthèse ultra-rapide ayant un rendement de presque 100 %, dans des conditions où un des réactifs est radioactif. On comprend qu'un nombre limité de sites puisse effectuer ce type de préparation. Comme il est souhaitable que de nombreux laboratoires et de nombreux centres médicaux puissent bénéficier de cette technique, le FDG, ou tout autre marqueur, est acheminé par hélicoptère selon un planning rigoureux organisé à l'avance.

La quantité de marqueur radioactif utilisée est très faible et dosée en fonction du poids du sujet. Il est éliminé très rapidement par les urines et malgré les différentes contraintes évoquées, la TEP est un outil exceptionnel et révolutionnaire pour de nombreuses études, en recherche fondamentale comme en milieu médical hospitalier.

**La chimie et la santé, au service de l'homme*, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2010.

**Les positons sont la première forme d'« antimatière » à avoir été mise en évidence (en 1932), également appelée antiélectron car c'est l'antiparticule associée à l'électron. Un positon possède une charge électrique +1.

debout (zone bleue) et la locomotion (zone rouge). L'étude a été faite en comparant des sujets sains, mais aussi aveugles et vestibulo-lésés, avec différenciation dans les deux parties de l'hippocampe. Marcher n'est pas simplement marcher, c'est effectuer une trajectoire, et par conséquent utiliser les mécanismes qui, dans le cerveau, concernent la navigation et le traitement de l'espace au sens large. Les mêmes aires cérébrales sont activées par la marche réelle et la marche imaginée comme nous l'avons vu, et les deux peuvent introduire des modifications des neuromédiateurs (ces molécules qui assurent la transmission chimique de l'influx nerveux sont décrites dans le [Chapitre de C.-Y. Guezennec](#)).

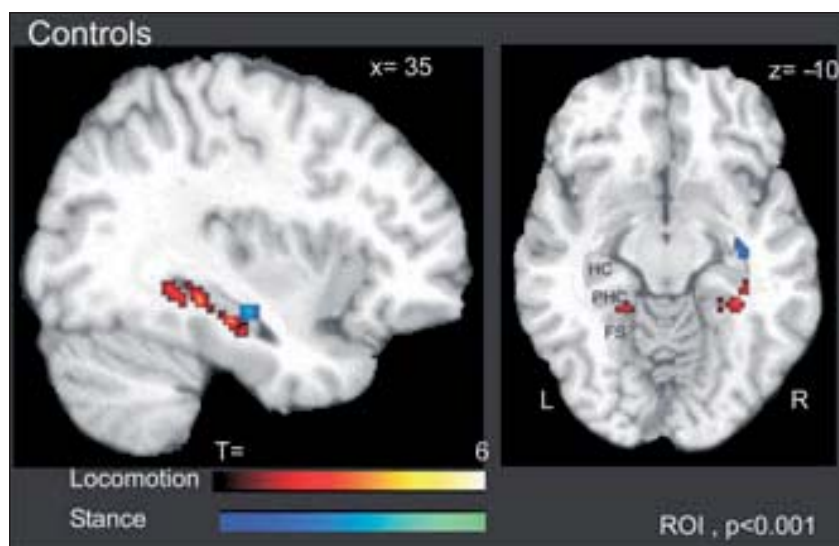


Figure 17

Au cours d'expériences chez des sujets sains, aveugles et vestibulo-lésés, l'hippocampe s'active pendant la station debout et la locomotion [13].

2 Quels sont les mécanismes utilisés par notre cerveau pour traiter ou mémoriser l'espace ?

Des expériences récentes publiées dans la revue *Science* en 2009 montrent effectivement que l'entraînement, comme l'imagerie mentale, provoquent des modifications de la production de dopamine corticale (un neuromédiateur) [14]. L'imagerie mentale peut donc induire des modifications des neuromédiateurs, au même titre que l'expérience ! On parle donc ici de chimie du cerveau, ce qui nous conduit à considérer l'influence de l'émotion.

2.1. Le cerveau des émotions

Cette chimie du cerveau a incité les chercheurs à étudier les relations entre la marche et l'émotion. Il est bien connu, et en particulier dans les activités sportives, qu'effectuer un mouvement ne se limite pas à « faire un mouvement. » On parle de l'influence du

mental, on parle d'émotion (voir aussi le *Chapitre de J.-F. Toussaint*). Il faut donc mettre en relation le cerveau cognitif, dont nous avons parlé jusqu'à présent, et le cerveau des émotions, dit reptilien (cerveau primaire qui régit les instincts de base). C'est le cerveau des sentiments : on entre dans un domaine aux frontières avec la prise de décision qui est impliquée dans le sport en général.

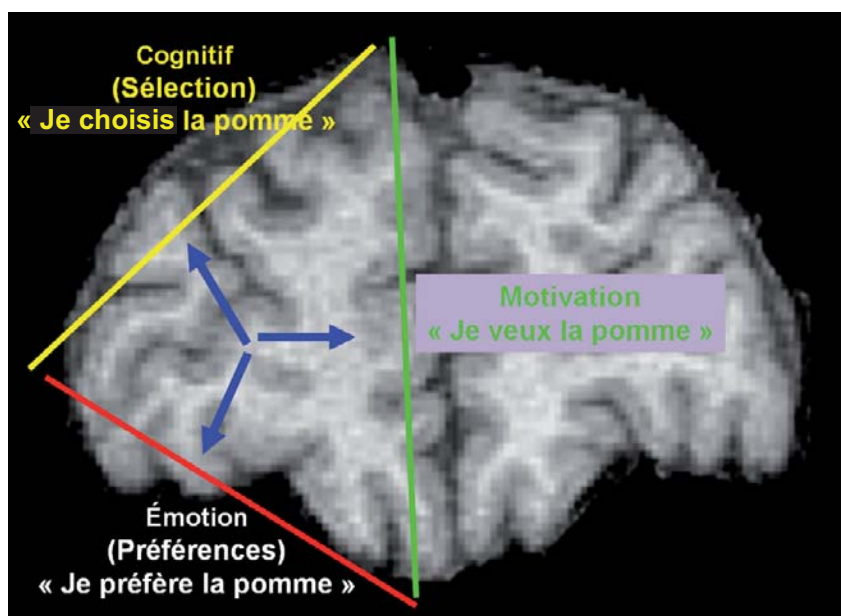
Pour expliquer le fonctionnement du cerveau dans ce cas, Étienne Kœchlin, polytechnicien neurologue et économiste, a proposé un modèle très élaboré à trois composantes : outre celle du cerveau cognitif (en jaune sur la *Figure 18*), une seconde composante dans une partie médiane du cerveau (en vert) pour tout ce qui est lié à la motivation (« Je veux la pomme », « Je veux faire ceci », « Je veux sauter à la perche ») et une troisième zone (en rouge) reliée à l'émotion et à la préférence (« Je préfère la pomme »).

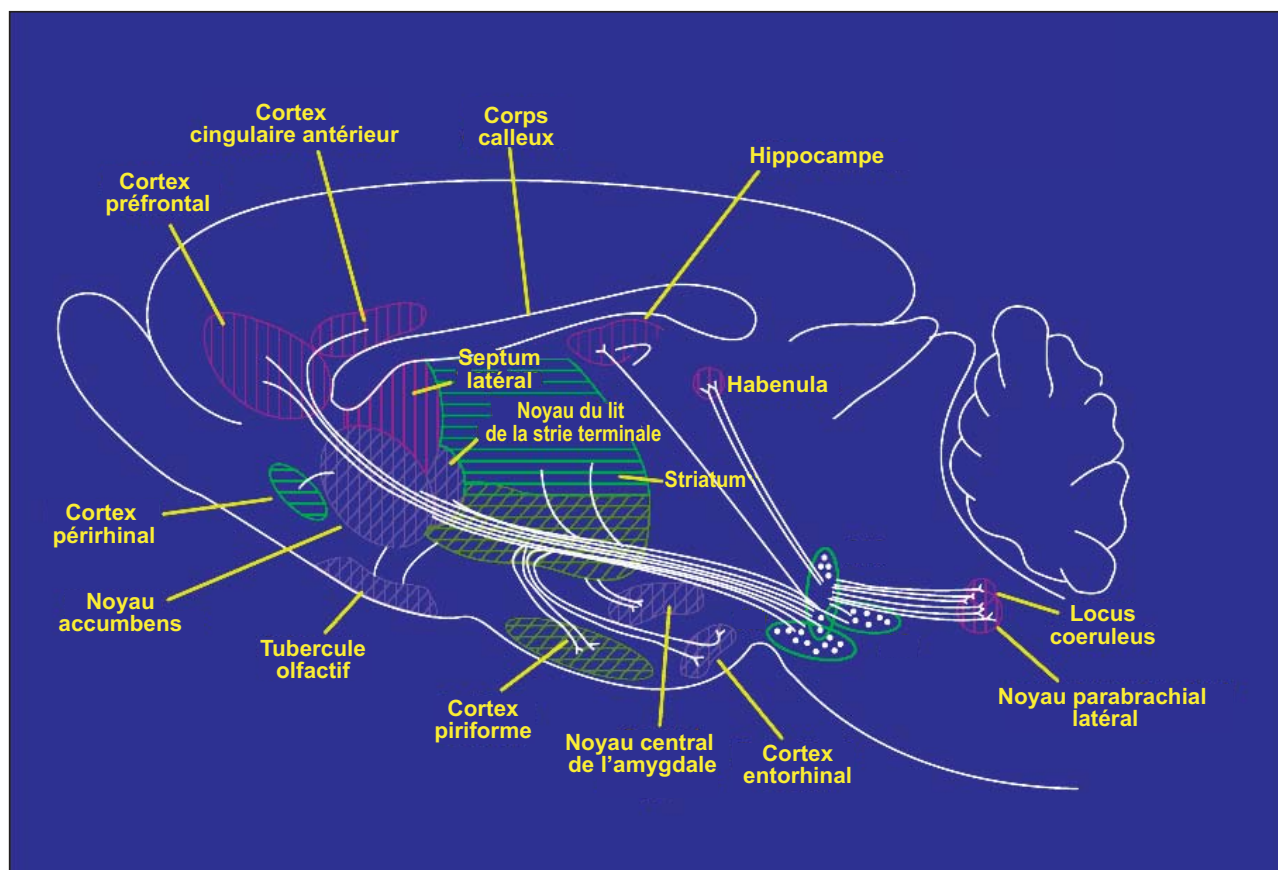
Différentes zones du cerveau sont représentées sur la *Figure 19*. Si l'on compare avec la *Figure 18*, on peut identifier toutes les structures : amygdales, frontales, préfrontales, orbito-frontales, etc., et tous les systèmes neuromodulateurs du cerveau des émotions qui disent « Je préfère faire ceci que cela ».

Un vaste champ d'études est maintenant ouvert où se retrouvent tous les chercheurs qui s'intéressent au mouvement. Ce domaine est en plein développement, car toutes les structures situées dans le cerveau limbique,

Figure 18

Le cerveau comporterait trois composantes liées à la sélection, la motivation et l'émotion [15].





dans le préfrontal, dans le pariétal ou dans les ganglions de la base sont contrôlées par des neuromédiateurs, et leur nature comme leur mécanisme d'action ne sont pas encore tous connus, même si des résultats fort importants ont déjà été obtenus (voir le [Chapitre de C.-Y. Guezennec](#)).

Pour étudier le rôle de l'anxiété dans les fonctions sensorimotrices, nous avons étudié, avec une équipe de psychiatres de l'hôpital de la Salpêtrière (Paris), les relations entre locomotion, posture, intégration multisensorielle⁷, anxiété et neuro-

pharmacologie, à l'aide d'un test classique (mais un peu exigeant !) dans lequel une petite souris doit traverser une barre qui tourne pour aller chercher la nourriture qu'elle convoite ([Figure 20](#)). Ce test est intéressant car non seulement il est multi-sensoriel, mais demande une grande agilité : les souris étaient soit très habiles et traversaient très vite la queue en l'air, très contentes, soit lentement, anxieuses comme un escadreur qui reste tout près de son mur. Les souris anxieuses appartenaient à des familles génétiques différentes. En effet, l'anxiété spatiale peut dépendre de facteurs génétiques. Ce paradigme a aussi permis de tester des neuromédiateurs anxiolytiques.

Désormais, nous l'avons déjà noté, l'athlète prépare

Figure 19

Les fonctions cognitives et motrices du cerveau sont sous le contrôle de mécanismes neuromodulateurs. La dopamine, la sérotonine, l'acétylcholine sont très importants dans les relations entre le cerveau des émotions et le cerveau cognitif. Cette image montre de façon très schématique certains des neurones qui assurent cette régulation. Ils sont situés dans la partie inférieure du cerveau et se projettent sur les structures du cerveau importantes pour la décision, l'action et l'émotion [16].

7. L'intégration multisensorielle est la capacité qu'a le système cognitif à intégrer des informations venues de différents récepteurs sensoriels en une représentation unifiée.

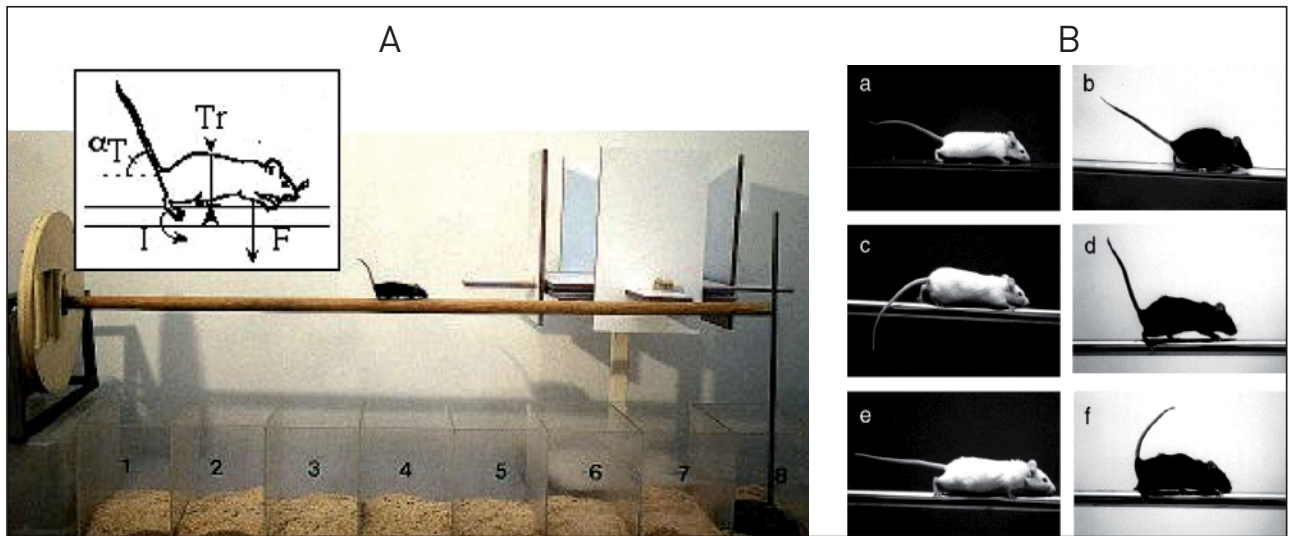


Figure 20

A) appareil dit « de la barre tournante » dont l'automatisation est envisagée. En encadré, les mesures fines de la posture (Tr : distance du tronc à la barre, α_T : angle de la queue avec l'horizontale). On mesure en plus le taux de chutes et de déséquilibre. B) en a et b : posture pendant le mouvement sur un support normal. En c et d : posture pendant le test sans traitement. En e : posture avec un traitement à l'anxiolytique (diazepam). En f : posture avec un traitement anxiogène pendant le 3^e et dernier jour [17].

Figure 21

Dans le slalom, le skieur prépare son épreuve mentalement avant de s'élancer à grande vitesse vers la piste. Les mêmes neurones sont-ils activés que ceux qu'il utilisera pendant son parcours ?



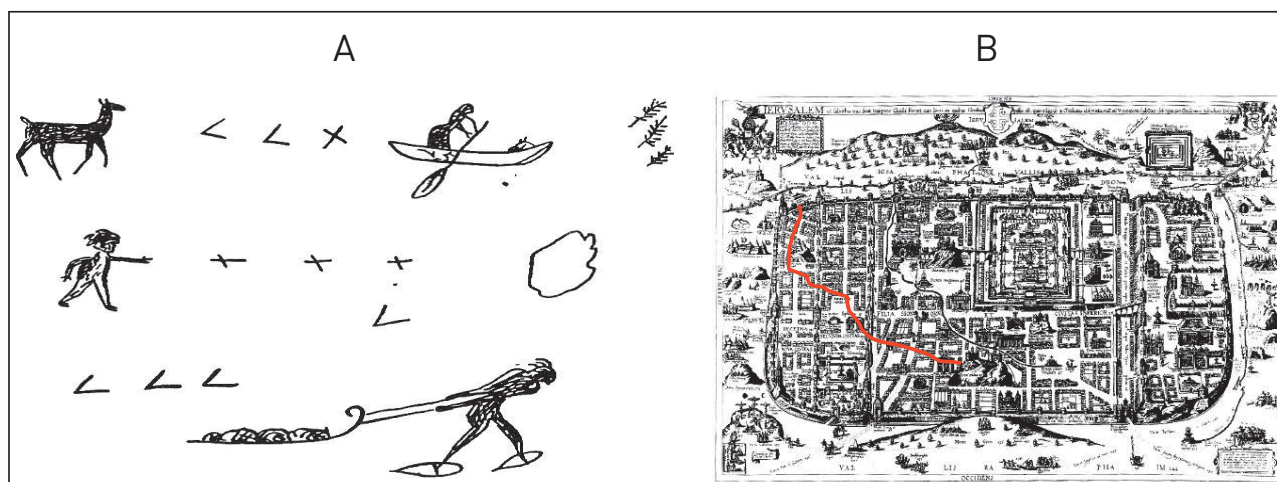
son épreuve mentalement. Pour cela, il utilise presque les mêmes réseaux de neurones que sur le terrain. On possède maintenant de nombreuses données sur les réseaux communs et sur les différences entre le parcours réel et le parcours simulé mentalement. Le cerveau est constitué d'un ensemble de réseaux relativement spécialisés qui travaillent ou non en coopération. Lorsque le sportif recrée mentalement les conditions d'une épreuve ou d'un parcours, il n'a pas de décision à prendre, alors que dans le monde réel, il sera obligé d'en prendre : il ne sera donc pas, dans l'une et l'autre des situations, dans le même état émotionnel (Figure 21) ; par exemple, il ne fera pas appel à sa mémoire de la même façon. Il faut donc être extrêmement prudent dans cette analyse et dans les conclusions qu'on en tire : il y a eu des incidents lorsqu'on a voulu trop se reposer sur l'entraînement mental lors de l'exécution (voir l'ouvrage *La décision*, « Pour en savoir plus »).

2.2. Le traitement et la mémoire de l'espace

2.2.1. Principes simplificateurs dans le traitement de l'espace : le mouvement s'inscrit dans l'espace

On trouve des principes simplificateurs dans le traitement de l'espace, car le cerveau doit faire la fusion de l'information en provenance de tous nos sens : par exemple, nous savons que dans le cerveau, une structure spécifique contrôle le mouvement des yeux et les informations en provenance de la rétine, que l'hippocampe contrôle notre navigation dans un espace géographique, alors que dans une autre partie du cerveau, le putamen, les neurones ne sont activés que par les mouvements. Il est donc miraculeux que nous ayons une perception unique de notre corps et de ses relations avec l'espace, et cette cohérence est une construction fragile !

Nous savons maintenant qu'il existe dans le cerveau des réseaux différents pour traiter



les différents espaces ; le cerveau perçoit ces espaces emboîtés comme des poupées russes : par exemple, si l'on dirige un pointeur laser sur un écran à sept centimètres ou à deux mètres, ce ne sont pas les mêmes réseaux du cerveau qui sont activés. Cela signifie que plusieurs systèmes coexistent dans le cerveau qui codent successivement l'espace corporel, l'espace immédiat, l'espace locomoteur et l'espace lointain [18].

On observe une modularité des espaces, qui est sans doute un principe de simplicité, parce qu'au cours de l'évolution, le cerveau a découvert de nouveaux besoins pour traiter l'action dans les différents espaces, et s'y est adapté.

Nous savons aussi qu'il y a deux façons de traiter l'espace : par exemple, on peut aller d'un lieu à un autre, soit en se rappelant des mouvements successifs, soit en ayant une carte du parcours (Figure 22). Nous appelons respectivement ces deux stratégies cognitives de codage égocentré et allocentré (où l'on survole en cartographie) ; c'est cette dernière qui nous

permet éventuellement de repartir par un chemin différent et qui est sans doute à la base de notre capacité à faire de la géométrie. Cette distinction entre la capacité de codage égocentré et allocentré est une notion assez récente qui ne fait l'objet d'un très grand nombre d'expériences que depuis moins d'une dizaine d'années.

Le rugby est un domaine d'application extrêmement intéressant pour ce type d'études puisqu'il faut dans ce sport à la fois gérer la coordination corporelle, la marche, et garder en tête la perception de l'ensemble de l'espace du terrain (Figure 23).

2.2.2. Les bases neuronales du traitement de l'espace

La Figure 24 est un exemple de test permettant d'étudier les bases neuronales de la perception de l'espace. On peut demander : laquelle de ces poubelles est la plus proche de vous ? C'est une tâche égocentrée de distance. Vous direz la verte ou la bleue. Mais on peut aussi demander : laquelle est la plus proche de la balle ? Ou laquelle est la plus proche de la façade la

Figure 22

Codage égocentré et allocentré de l'espace : A) Route égocentrique topo-kinesthésique⁸ ; B) Survol allocentrique topographique [19].

Figure 23

Ces sportifs engagés dans des épreuves corporelles doivent en même temps garder en tête l'organisation globale du jeu sur l'ensemble du terrain. Ces deux traitements de l'espace (corporel et proche d'une part, et collectif et global d'autre part) correspondent à deux stratégies de traitement de l'espace (égocentré, espace proche et allocentré, espace lointain) impliquant des réseaux différents du cerveau qui doivent donc être coordonnés.



8. Kinesthésie : du grec *kinesis* = mouvement et *aisthesis* = sensibilité. Ce terme désigne la sensation du mouvement provoquée par les divers déplacements du corps et de ses parties.

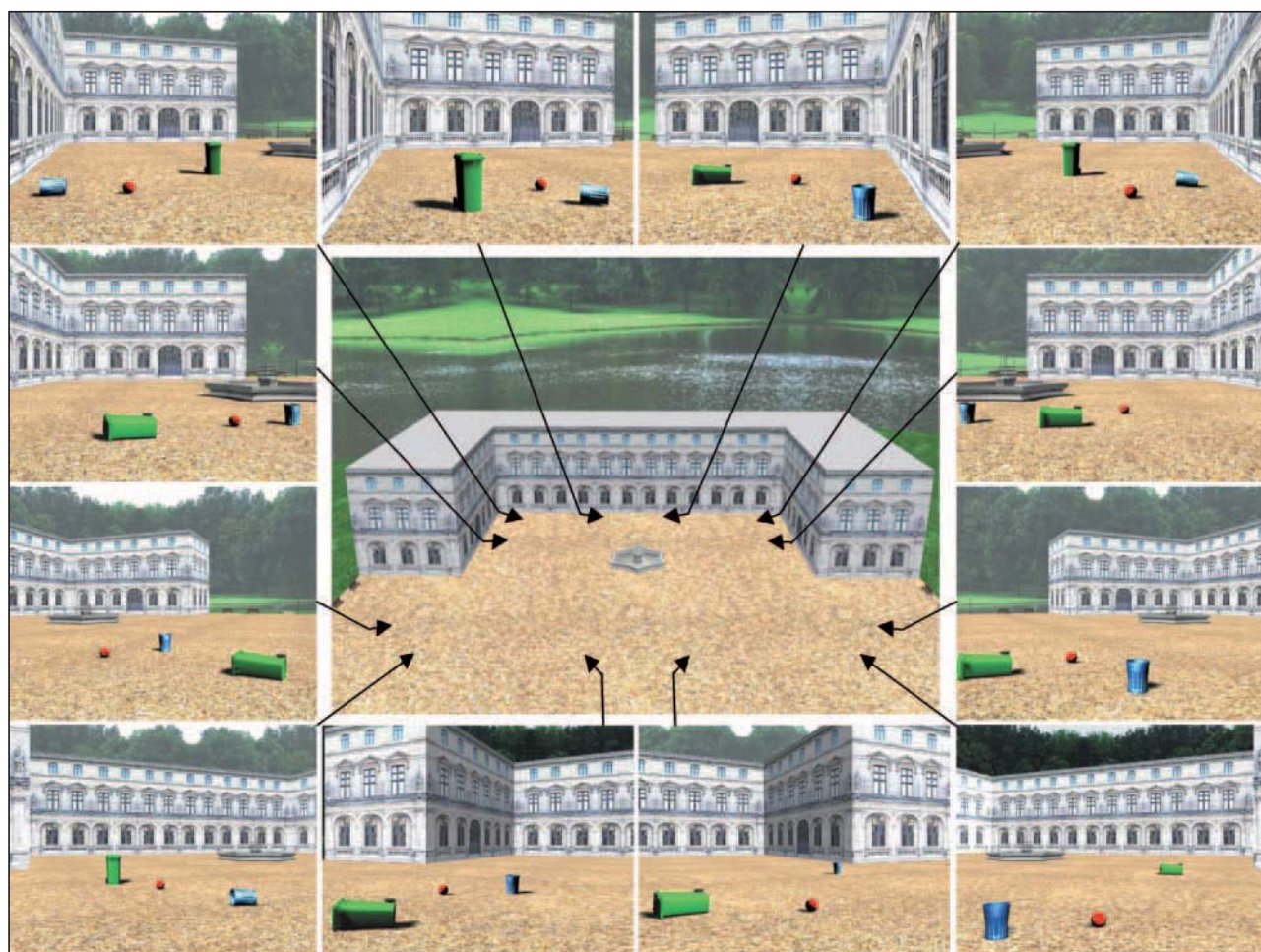


Figure 24

Exemple de paradigme pour étudier les bases neuronales de la manipulation de l'espace. On dispose, dans la cour d'un château virtuel, deux poubelles et une balle, et on demande au sujet placé dans l'IRM de dire : laquelle des poubelles est tombée (contrôle) ; laquelle est plus proche de l'observateur (tâche égocentrée) ; laquelle est plus proche de la façade du palais (tâche allocentrée) ? [20].

plus longue du palais ? Dans ces deux cas, vous n'aurez pas besoin de vous référer à votre corps. C'est un codage allocentré qui intervient. On peut aussi, avant de faire l'expérience, promener les sujets dans un palais virtuel, ne leur montrer qu'une toute petite image, ce qui les force à reconstruire mentalement l'ensemble du palais. Dans ce test, on oblige ainsi les sujets de l'expérience à changer de référentiel, à passer d'un référentiel égocentré à allocentré, comme on le fait aussi en voiture lorsqu'on passe de la conduite automobile à la lecture du GPS s'il indique une carte ; ou encore comme le joueur de rugby ou de football quand il doit s'occuper à la fois de ce qui se passe autour

de lui et garder une image globale de ce qui se passe sur le terrain (comme le montrent les caméras de la télévision). La **Figure 25** montre bien que les systèmes cérébraux impliqués dans ces deux stratégies ne sont pas les mêmes. C'est le système pariéto-frontal qui intervient pour l'aspect égocentré, et un système qui implique d'autres structures telles que l'hippocampe, le para-hippocampe et rétrosplénial pour d'autres stratégies cognitives impliquant le changement de point de vue ou une perspective allocentrée. Il existe donc une sorte de répertoire de mécanismes pour traiter les différents espaces et les différentes stratégies de représentation de l'espace.

À partir de l'analyse comportementale de souris navigant dans un labyrinthe en étoile nommé « starmaze » qui permet de distinguer entre stratégie « égocentrée » et « allocentrée », Laure Rondi Reig et ses collaborateurs ont montré que la destruction (par un méthode de suppression sélective génétique d'un mécanisme de mémorisation basé sur un récepteur synaptique important) de cette fonction particulière de l'hippocampe, empêchait une souris de s'orienter en utilisant une stratégie allocentrée (Figure 26). Nous avons adapté ce paradigme à l'homme en créant un monde virtuel qui ressemblait au « starmaze » et montré qu'on peut utiliser ce paradigme pour mettre en évidence les stratégies individuelles. De plus, le cerveau gauche ne traite pas les mêmes informations que le cerveau droit.

Tous ces mécanismes sont mis en jeu de façon très différente suivant les sujets. Il faut insister sur la variété des stratégies que peuvent employer différentes personnes. Une découverte importante pour le sport, mais aussi pour la pathologie et l'éducation en général, est la différence entre les sexes. On a montré que les zones cérébrales activées sont différentes chez un homme et chez une femme se déplaçant dans une tâche de navigation virtuelle. Les hommes et les femmes ne traitent donc pas l'espace de la même façon. Notre laboratoire a réalisé plusieurs études sur cette différence importante. La compréhension de ce phénomène va

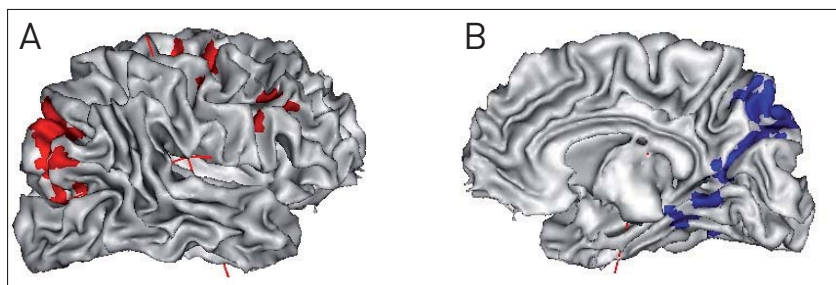


Figure 25

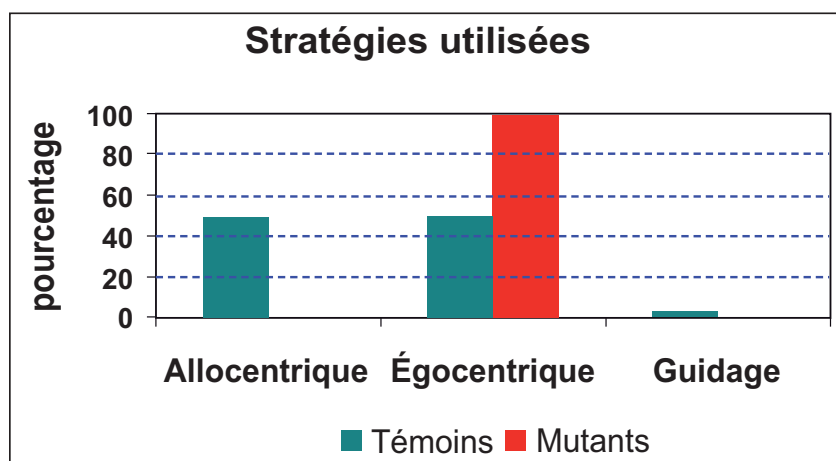
A) Quelques aires cérébrales impliquées dans le codage égocentré (« quelle poubelle est la plus proche de vous ? ») dans la tâche de la Figure 24 ; B) Quelques aires cérébrales impliquées dans le codage allocentré (« quelle poubelle est la plus proche de la façade la plus longue du palais ? ») dans la même tâche.

nécessiter la collaboration avec les spécialistes des hormones et de la neuropharmacologie. Cette différence, connue depuis longtemps des psychologues, n'a pu être mise en évidence dans des tâches de navigation que grâce aux données récentes d'imagerie cérébrale : les structures cérébrales concernées par le traitement de l'espace ne sont pas les mêmes chez l'homme et chez la femme [21].

Il existe de fait des différences anatomiques entre les sexes, par exemple l'asymétrie observée chez l'homme du cortex pariétal pourrait être d'origine hormonale et être responsable de la différence observée entre les sexes ? On pense actuellement que l'asymétrie des deux hémisphères pourrait être régulée par les androgènes qui induiraient une augmentation de la taille du cortex droit chez l'homme.

Figure 26

Analyse comportementale des souris avec un déficit fonctionnel de l'hippocampe dans le « starmaze » [21].



Existe-t-il des bases hormonales responsables de ces différences entre les sexes ? Il a été montré que chez les femmes, le cycle menstruel, et donc les œstrogènes, influencent la performance lors de tâches spatiales. Chez l'homme ce sont les taux de testostérone qui jouent un rôle important avec des variations journalières mais aussi saisonnières. Les hommes aux taux de testostérone bas ont de meilleures performances dans des tâches spatiales que ceux aux taux élevés (voir aussi le [Chapitre de C.-Y. Guezennec](#)). Des

études très complexes et très longues ont été réalisées sur les variations saisonnières des compétences spatiales chez de jeunes hommes : la seule différence significative observée concerne les « tâches masculines » (c'est-à-dire celles que les hommes réussissent mieux que les femmes) pour lesquelles l'automne semble être une saison plus favorable (voir aussi le [Chapitre de J.-F. Toussaint](#)). Ici encore il faut approfondir ces mécanismes pour ne pas se hâter de tirer des conclusions de ces données encore limitées [22b].

Conclusion

Cette approche de l'explication du contrôle du mouvement et du traitement de l'espace et de la mémoire de l'espace à l'aide des principes simplificateurs de la « simplicité » montre que malgré des avancées importantes, de nombreuses questions restent posées pour relier les aspects mécaniques et cognitifs de ces phénomènes avec les aspects plus profonds, chimiques et biologiques, du fonctionnement du cerveau.

Les progrès récents de la connaissance dans ce domaine n'ont été réalisés que grâce à des études très interdisciplinaires dans lesquelles n'interviennent pas encore assez de chimistes et de neuropharmacologues.

Les champs d'applications de ces recherches dépassent celui du sport. Ils concernent bien entendu d'abord le secteur clinique où

les neurophysiologistes, les neurologues et les psychiatres coopèrent depuis longtemps sur la compréhension des grandes maladies neurologiques telles que la maladie de Parkinson et la maladie d'Alzheimer. De nouvelles coopérations sont maintenant en cours avec les psychiatres pour l'étude de l'agoraphobie, les troubles du schéma corporel, les patients schizophrènes et les enfants autistes, etc. L'hypothèse est que dans chacune de ces maladies, on trouve des déficits spécifiques du traitement de l'espace et, de façon plus générale, des mécanismes « simples ».

Bibliographie

[1] Figure redessinée par A. Berthoz d'après Muybridge E. (1957). *The Human Figure in Motion*. New York: Dover Publications. Publiée dans : Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob et dans : Berthoz A. (2010). *Regards sur le sport*. Le Pommier.

[2] a) Pozzo T., Berthoz A., Lefort L. (1990). *Exp. Brain Res.*, **82** : 97-106 ; b) Pozzo T., Berthoz A. et al. (1991). *Exp. Brain Res.*, **85** : 1-10.

[3] Travaux de l'équipe du professeur Francesco Lacquaniti depuis 1996 ; Ivanenko et al. ; Flash et al. (2008) ; Hicheur H., Terekhov A.V., Berthoz A. (2006). Intersegmental coordination during human locomotion: does planar covariation of elevation angles reflect central constraints ? *J. Neurophysiol.*, **96** : 1406-1419.

[4] Cheron G., Bouillot E., Dan B., Bengoetxea A., Draye J.P., Lacquaniti F. (2001). Development of a kinematic

coordination pattern in toddler locomotion: planar covariation. *Experimental Brain Research*, **137** : 455-466.

[5] a) Lacquaniti F., Terzuolo C., Paolo Viviani P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, **54** : 115-130 ; b) Maoz U., Berthoz A., Flash T. (2009). Complex Unconstrained Three-Dimensional Hand Movement and Constant Equi-Affine Speed. *J. Neurophysiol.*, **101** : 1002-1015.

[6] Vieilledent S., Kerlirzin Y., Dalbera S., Berthoz A. (2001). Relationship between velocity and curvature of a locomotor trajectory in human locomotor trajectory. *Neurosci. Lett.*, **305** : 65-69.

[7] a) Arechavelata G., Laumond J.P., Hicheur H., Berthoz A. (2008). On the nonholonomic nature of human locomotion. *Autonomous Robots*. **25** : 25-35 ; b) Polyakov F., Stark E., Drori R., Abeles M., Flash T. (2009). Parabolic movement primitives

and cortical states: merging optimality with geometric invariance. *Biol. Cybern.*, **100** : 159-184.

[8] Takei Y., Grasso R., Berthoz A. (1996). Quantitative analysis of human walking trajectory on circular path in darkness. *Brain Res. Bull.*, **5/6** : 491-496. Kadone H., Berthoz A., Bennequin, D., Bernardin D. (2010). Gaze control of locomotion Proceedings ROMAN Congress IEE (sous presse).

[9] Mc Intyre J., Senot P., Berthoz A., Zago M., Lacquaniti F. (2001). Does the brain model Newton's laws ? *Nature Neuroscience*, **4** : 693-694.

[10] Mc Intyre J., Zago M., Berthoz A., Lacquaniti F. (2001). *Nature Neuroscience*, **4** : 693-694.

[11] Willems M., Toni I., Hagoort P., Casasanto D. (2009). *Frontiers in Human Neuroscience*, **3** : 1-9.

[12] la Fougère C., Zwergal A., Rominger A., Förster S., Fesl G., Dieterich M., Brandt T., Strupp M., Bartenstein P., Jahn K. (2010). Real versus imagined locomotion: a [18F]-FDG PET-

fMRI comparison. *NeuroImage*, **50** : 1589-1598.

[13] Jahn K., Wagner J., Deutschländer A., Kalla R., Hufner K., Stephan T., Strupp M., Brandt T. (2009). *Human hippocampal activation during stance and locomotion. Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **1164** : 229-235.

[14] McNab F., Varrone A., Farde L., Jucaite A., Bystritsky P., Forssberg H., Klingberg T. (2009). Changes in Cortical Dopamine D1 Receptor Binding Associated with Cognitive Training. *Science*, **323** : 800-802.

[15] a) Koechlin E., Hyafil A. (2007). Anterior Prefrontal Function and the Limits of Human Decision-Making. *Science*, **318** : 594-598 ; b) Koechlin E., Summerfield C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends Cogn. Sci.*, **11** : 229-235 ; c) Summerfield C., Koechlin E. (2009). Decision-making and prefrontal executive function. *The Cognitive Neurosciences*, Ed. M. Gazzaniga, 1119-30.

[16] Rolls E.T. (1999). *The Brain and Emotion*, Oxford University Press.

[17] Lepage E.M., Venault P., Perez-Diaz F., Joubert C., Berthoz A., Chapouthier G. (2000). Balance control and posture differences in the anxious BALB/cByJ mice compared to the non

anxious C57BL/6J mice. *Behav. Brain Res.*, **117** : 185-195.

[18] Weiss P.H., Marshall J.C., Wunderlich G., Tellmann L., Halligan P., Freund H.-J., Zilles K., Fink G.R. (2000). Neural consequences of acting in near versus far space: a physiological basis for clinical dissociations. *Brain*, **123** : 2531-2541.

[19] Tversky B. (2001). *Spatial Schemas and Abstract Thought*, The MIT Press, Chap. 4, 77-112.

[20] Committeri G., Galati G., Paradis A.-L., Pizzamiglio L., Berthoz A., Le Bihan, D. (2004). Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object- and landmark-centered judgments about object location. *J. Cog. Neurosci.*, **16** : 1517-1535.

[21] a) Igloi K., Zaoui M., Berthoz A., Rondi-Reig L. (2009). Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus*, **19** : 1199-211. b) Iglói K., Doeller C.F., Berthoz A., Rondi-Reig L., Burgess N. (2010). Lateralized human hippocampal activity predicts navigation based on sequence or place memory. *PNAS*, **107** : 14466-14471.

[22] a) Grön G., Wunderlich A.P., Spitzer M., Tomczak R., Riepe M.W. (2000). Brain activation

during human navigation: gender-different neural networks as substrate of performance. *Nature Neuroscience*, **3** : 404-408 ; b) Lambrey S., Berthoz A. (2007). Gender differences in the use of external landmarks versus spatial representations updated by self-motion. *J. Integr. Neurosci.*, **6** : 379-401.

Pour en savoir plus :

- Berthoz A. (2009). *La simplicité*, Odile Jacob. Traduction : Berthoz A. (2011). *Simplexity*, Yale Univ Press/Odile Jacob.

- Berthoz A. (2003). *La décision*, Odile Jacob. Traduction Berthoz A. Emotion and Reason: the cognitive basis of decision making. Oxford Univ Press.

- Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob. Traduction : Berthoz A., (2000). *The Brain's sense of movement*, Harvard Univ Press.

- Berthoz A. et Petit J.L. (2008). *Phénoménologie et Physiologie de l'action*. Odile Jacob.

- Berthoz A., Jorland G. (2005). *L'empathie*. Odile Jacob.

Crédits photographiques

Fig. 3 : « L'homme qui court », d'après Berthoz A. (2010). *Regards sur le sport*. Le Pommier. D'après l'image parue dans Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.

Fig. 5 : Cheron G., Bouillot E., Dan B., Bengoetxea A., Draye J.P., Lacquaniti F. (2001). Development of a kinematic coordination pattern in toddler locomotion: planar covariation. *Experimental Brain Research*, **137** : 455-466.

Fig. 9 : A) *Tolérance*, Ahmad Dari. B) *Psyché ranimée par le baiser de l'Amour*, groupe d'Antonio Canova, 1787. Musée du Louvre.

Fig. 13 : Image parue dans Berthoz A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.

Fig. 16 : la Fougère C., Zwergal A., Rominger A., Förster S., Fesl G., Dieterich M., Brandt T., Strupp M., Bartenstein P., Jahn K. (2010). Real versus imagined locomotion: a [18F]-FDG PET-fMRI comparison. *NeuroImage*, **50** : 1589-1598.

Fig. 17 : Jahn K., Wagner J., Deutschländer A., Kalla R., Hufner K., Stephan T., Strupp M., Brandt T. (2009). *Human hippocampal activation during stance and locomotion*. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **1164** : 229-235.

Fig. 20 : Lopicard E.M., Venault P., Perez-Diaz F., Joubert C., Berthoz A., Chapouthier G. Balance control and posture differences in the anxious BALB/cByJ mice compared to the non anxious C57BL/6J mice. (2000). *Behav. Brain Res.*, **117** : 185-195.

Fig. 22 : Tversky B. (2001). *Spatial Schemas and Abstract Thought*. The MIT Press, Chap. 4, 77-112.

Fig. 24 : Committeri G., Galati G., Paradis A.-L., Pizzamiglio L., Berthoz A., Le Bihan, D. (2004). Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object- and landmark-centered judgments about object location. *J. Cog. Neurosci.* **16**: 1517-1535.

Fig. 25 : Alain Berthoz. (2009). *La simplicité*. Odile Jacob.