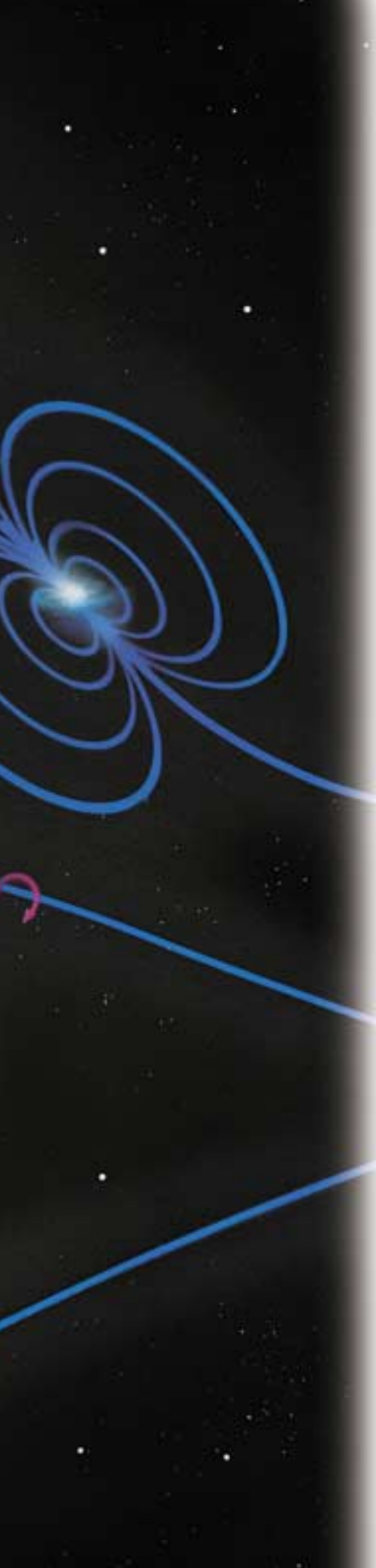




cosmiques longues de plusieurs millions d'années-lumière. Les antiparticules sauteraient ainsi de galaxie en galaxie, tout comme un ivrogne qui suivrait les pâtés de maison, choisissant les directions au hasard, aux croisements. Les antiparticules pourraient ne couvrir que quelques centaines de millions d'années-lumière à partir de leur source, même si elles voyageaient pendant un temps comparable à l'âge de l'Univers. Cette distance est bien plus courte que les milliards d'années-lumière nous séparant de l'antigalaxie la plus proche.

Même si, par hasard, une antiparticule approchait de notre Galaxie, rien n'indique qu'elle atteindrait la Terre : le champ magnétique de l'intérieur de la Galaxie, bien plus intense que le champ intergalactique, dévie la grande majorité des antiparticules incidentes ; l'ivrogne enfin arrivé chez lui ne trouve plus les clefs pour ouvrir la porte.

Les prochains vols

La recherche d'antiparticules lourdes dans notre Galaxie continue. Le Ministère américain de l'énergie finance aujourd'hui le projet d'envoi d'un détecteur d'antimatière dans un satellite. Le dispositif, nommé spectromètre magnétique alpha (AMS) cherchera principalement des antiprotons et des antineutrons. La NASA prévoit de tester le détecteur AMS à bord de la navette spatiale au cours de l'année 1998. Si tout se passe bien, le détecteur sera ensuite envoyé dans la station spatiale pour une durée de trois ans, à partir de 2002.

Sur une durée de fonctionnement aussi longue, AMS devrait avoir une sensibilité 100 fois supérieure à celle des précédents détecteurs d'antimatière. Saura-t-on toutefois distinguer les particules des antiparticules ? Pour identifier une antiparticule lourde parmi 100 millions de particules, un détecteur doit déterminer correctement la déviation de chaque particule dans un champ magnétique. Les instruments

les plus précis qui ont été embarqués dans des ballons font parfois plus de 15 mesures pour déterminer la déviation des particules rapides, mais le détecteur AMS n'en fera que six.

Un autre détecteur d'antimatière cosmique, PAMELA, doit également être lancé à Baïkonour, en l'an 2000. Plus complexe que AMS, il cherchera les positons, les antiprotons et les antineutrons lourds. En raison de sa petite taille, il collectera moins de rayons cosmiques, de sorte que sa recherche d'antiparticules lourdes risque de ne pas être assez minutieuse.

D'autres recherches d'antimatière cosmique par ballon sont prévues. Par exemple, nous construisons aujourd'hui une nouvelle version du détecteur HEAT afin d'observer les antiprotons de haute énergie, au cours de vols plus longs. En Antarctique, la NASA a testé des ballons de haute altitude qui ont volé jusqu'à 20 jours autour du pôle Sud, et l'équipe NASA des îles Wallops met au point des enveloppes de ballon allégées afin d'obtenir des vols qui dureraient jusqu'à 100 jours ; les vols d'essai de ces ballons auront lieu dans les prochains mois.

La recherche de l'antimatière cosmique bat son plein. Avec les premières expériences, les astrophysiciens voulaient prouver que matière et antimatière existent en quantités égales dans l'Univers, mais ils ont détecté une asymétrie de l'Univers. Puis les détecteurs d'antimatière ont trouvé très peu de positons et d'antiprotons dans les rayons cosmiques, et aucune antiparticule lourde. Les physiciens conservent l'espoir que des antiétoiles et des antigalaxies se cachent quelque part dans l'Univers, à des milliards d'années-lumière de notre Galaxie, mais les antiparticules lourdes de ces régions lointaines atteignent-elles la Terre ? L'enjeu de la quête est considérable : c'est l'identification de la nature de la matière sombre, qui semble composer les halos des galaxies.

Gregory TARLÉ et Simon SWORDY sont respectivement professeurs de physique à l'Université du Michigan et à l'Université de Chicago.

Edward W. KOLB et Michael S. TURNER, *The Early Universe*, Addison-Wesley, 1990.

James W. CRONIN, Thomas K. GAISER et Simon P. SWORDY, *Les rayons cosmiques*, in *Pour la Science*, mars 1997.

Fred C. ADAMS et al., *Constraints on the Intergalactic Transport of Cosmic Rays*, in *Astrophysical Journal*, vol. 491, pp. 6-12, 10 décembre 1997.

Les muscles, organes de la perception

JEAN-PIERRE ROLL

Les muscles renseignent le cerveau sur nos postures et nos mouvements. L'excitation artificielle de leurs capteurs sensoriels crée des illusions de mouvement et facilite la rééducation.

En 1754, Étienne Bonnot, abbé de Condillac, dans son *Traité des sensations*, propose de doter une statue des cinq sens (l'odorat, l'ouïe, la vue, le toucher et le goût) pour qu'elle accède à la connaissance. La statue ne peut toutefois apprendre à voir avec des yeux immobiles, ni à toucher avec des mains figées dans le marbre. Elle n'accède enfin aux délices de ce monde et à son entendement que lorsqu'elle est capable de mouvements. À partir de cet instant seulement se forge en elle le sentiment d'habiter un corps, de le connaître, de le situer dans l'espace, ou tout simplement d'exister avec et par lui.

Que nous enseigne cette parabole ? Que nos organes des sens, qui assurent la saisie d'informations sur nous-mêmes et sur notre environnement, ne rempliraient pas leurs fonctions s'ils n'étaient portés par un corps mobile. Orienter le regard pour saisir une image, tendre l'oreille pour mieux capter un son, saisir ou manipuler un objet afin d'en connaître le poids, la forme, la température ou la texture sont autant d'« actions perceptives » : nous déplaçons nos organes des sens vers leurs stimulus spécifiques. Pour cette raison déjà, les muscles, dont les contractions assurent ces déplacements, sont des organes de la perception.

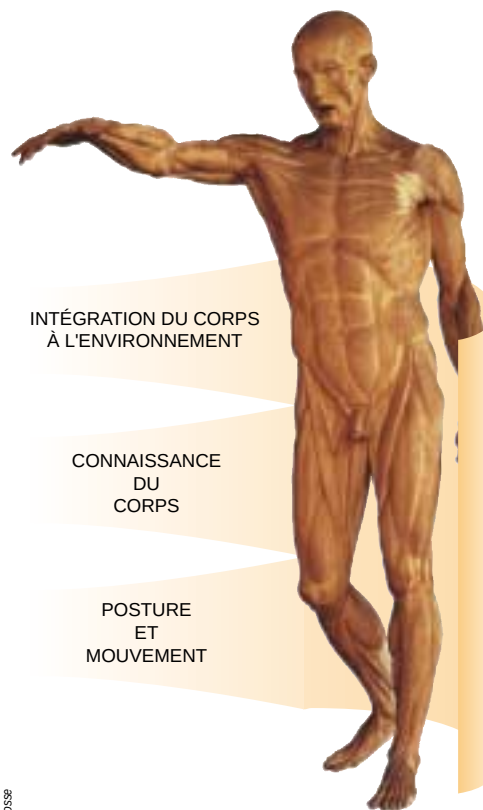
Les muscles ont aussi une fonction perceptive propre. Tandis que le système nerveux central commande les actions réflexes ou intentionnelles des muscles, ces derniers lui adressent, en retour, des informations sur le déroulement de ces actions : ils

contiennent des capteurs sensibles à leur longueur et à leurs variations de longueur. Les muscles sont donc des organes des sens à part entière, comme l'œil, l'oreille ou la peau. Ce « sixième sens », suspecté par Charles Bell dès 1823, fut nommé au début de notre siècle « sens musculaire » par Charles Sherrington,

qui le rangea parmi les sensibilités proprioceptives (dont les capteurs sont liés aux instruments moteurs et d'orientation spatiale du corps : les muscles, les tendons, les articulations et l'oreille interne). Pour cet auteur déjà, ce « sens secret » constituait l'une des bases de « l'ancrage organique de notre identité ».

La description, en 1986, par Oliver Sacks, d'une « femme désincarnée », montre bien que certaines polynévrites aiguës, qui entraînent la disparition sélective des plus grosses fibres nerveuses sensibles provenant des muscles, conduisent à une perte de tout sentiment d'appartenance à un corps.

Les illusions de mouvement, obtenues en manipulant la sensibilité musculaire, révèlent que le cerveau connaît nos mouvements grâce aux messages que lui adressent nos muscles et qu'il tient compte de ceux provenant des autres sens. Le cerveau se structure ainsi continuellement au cours de la vie, grâce aux activités sensorielles déclenchées par ses propres commandes motrices. La sensibilité musculaire occupe une place prépondérante lors de nos apprentissages moteurs et des réapprentissage consécutifs à des lésions du cerveau lui-même ou de notre appareil moteur.



1. LES MUSCLES sont des organes moteurs, et ils sont aussi pourvus de capteurs sensibles à leurs longueurs et à leurs allongements : les informations qu'ils transmettent au système nerveux nous font accéder, comme les autres sens, à la conscience de notre corps et à sa place dans l'environnement.

Certaines fibres musculaires sont sensibles

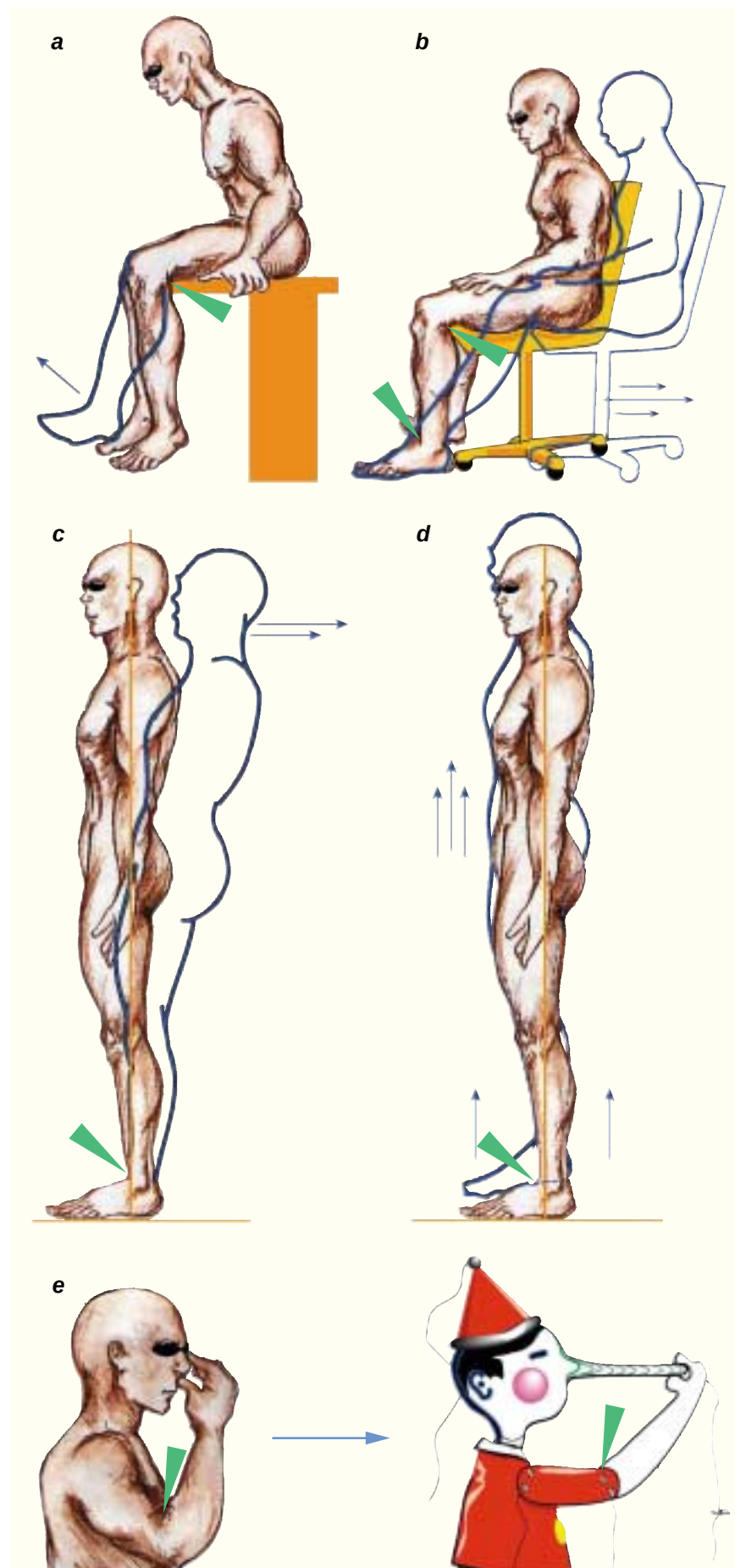
Comment le tissu musculaire, moteur et sensible à la fois, nous informe-t-il sur les attitudes et les actions de notre corps ? En 1863, Wil-

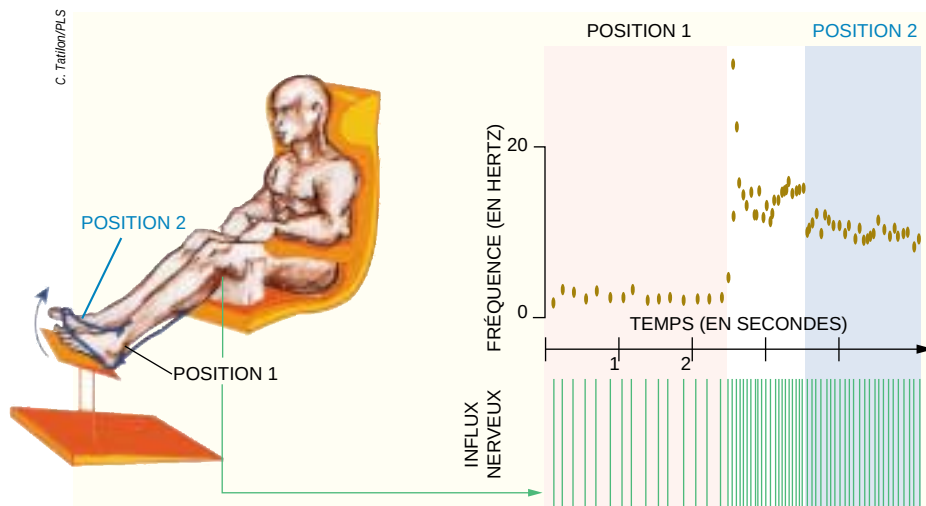
helm Kühne décrit, dans des muscles de petits mammifères, des formations cellulaires qu'il nomme fuseaux neuromusculaires en raison de leur forme allongée et de leur renflement central. Un fuseau neuromusculaire est formé de quatre à six fibres musculaires courtes (deux à cinq millimètres de long) et fines, dont la partie centrale (équatoriale), non contractile, est enfermée dans une capsule emplies d'un liquide visqueux (voir l'encadré page 96). On qualifie d'«intrafusales» ces fibres musculaires, par opposition aux fibres musculaires motrices, dites «extrafusales».

Sherrington confirme, dès 1893, que ces fuseaux neuromusculaires sont des structures sensorielles : des terminaisons sensibles innervent la zone équatoriale des fibres intrafusales. Les corps cellulaires des neurones issus de ces terminaisons sont dans les ganglions des racines rachidiennes dorsales (les structures par où les fibres nerveuses sensibles pénètrent dans la moelle épinière). De ces corps cellulaires, des axones partent vers de nombreuses structures nerveuses centrales, telles que la moelle épinière, le cervelet et les régions pariétales de l'écorce cérébrale. Là, les informations issues des fuseaux neuromusculaires sont utilisées pour la gestion de la motricité réflexe ou intentionnelle, ou pour l'élaboration de la connaissance des activités du corps et de ses rapports avec l'environnement.

Les muscles des yeux, des doigts ou du cou hébergent plusieurs dizaines

2. DES ILLUSIONS DE MOUVEMENTS sont créées par l'application de vibrations mécaniques (*flèches vertes*) sur les tendons d'un muscle, à des fréquences de quelques dizaines de hertz, et lorsque la vue du sujet est occultée. Le sujet a l'impression d'un mouvement qui étirerait le muscle ainsi stimulé, mais qui dépend de sa posture et des informations que lui apportent les autres sens. La vibration du muscle ischio-jambier d'un sujet assis (a) lui donne l'illusion d'une extension de sa jambe. Si l'on stimule les muscles ischio-jambiers et jambiers antérieurs de la même personne assise sur une chaise à roulettes et dont les pieds sont posés sur le sol (b), elle a l'impression de glisser vers l'arrière avec la chaise. La stimulation des jambiers antérieurs d'une personne debout lui donne l'illusion d'un basculement de tout son corps vers l'arrière (c). Après quelques jours passés en microgravité dans une station spatiale, cette illusion est remplacée par celle d'un déplacement du corps vers le haut (d). Enfin, la stimulation du biceps d'une personne qui se tient le nez pincé entre le pouce et l'index (e), donne à celle-ci, le plus souvent, la sensation que son nez s'allonge, tel celui de Pinocchio.





3. LES SIGNAUX SENSITIFS émis pendant les mouvements de la cheville par une terminaison nerveuse primaire sont enregistrés à l'aide d'une microélectrode introduite dans le nerf tibial postérieur. On enregistre une suite d'impulsions nerveuses à une fréquence caractéristique de la longueur du muscle (*position 1*). Lorsque le muscle est étiré, la fréquence des impulsions augmente en fonction de la vitesse du mouvement, puis se stabilise lorsque la longueur du muscle devient constante dans une nouvelle position (*position 2*).

de fuseaux neuromusculaires par gramme de tissu alors que ceux du mollet par exemple, dont la taille est supérieure, en sont moins largement dotés. La richesse de l'équipement sensoriel de nos muscles semble liée à la finesse et à la précision des actions qu'ils sont amenés à réaliser.

Les terminaisons nerveuses des fuseaux neuromusculaires sont sensibles à la fois à la longueur des muscles qui les abritent et aux variations de cette longueur. On enregistre, chez l'homme, les signaux qu'elles émettent en introduisant une micro-électrode de tungstène stérile dans un nerf superficiel du bras ou de la jambe. Dès le début des années 1980 nous avons ainsi, avec Jean-Pierre Vedel, confirmé et complété chez l'homme ce que la neurophysiologie animale nous avait appris du fonctionnement de ces récepteurs.

Dans un muscle dont la longueur est constante, les terminaisons nerveuses émettent un message sensitif (voir la figure 3) : une série d'impulsions électriques à une fréquence caractéristique de la longueur du muscle. Lorsque le muscle est déformé, la fréquence des impulsions varie : elle s'accroît lorsque le muscle est étiré, et d'autant plus que cet étirement est important et rapide ; elle décroît lorsque le muscle se raccourcit. Ces variations de fréquence rendent compte, en temps réel, à la fois de la vitesse à laquelle le muscle est étiré et de la longueur à laquelle il est stabilisé.

Les signaux nerveux issus de la totalité des muscles qui mobilisent

une articulation sont reçus et traités simultanément par le système nerveux central : il en déduit le mouvement. Ainsi, nous avons montré récemment, avec Edith Ribot-Ciscar, que le codage cérébral de la vitesse d'un mouvement de flexion repose sur la différence entre les fréquences des signaux sensitifs issus des muscles agonistes (qui se contractent) et antagonistes (qui s'allongent). La fréquence des signaux nerveux émis par les fuseaux neuromusculaires diminue dans les muscles agonistes et s'accroît dans les muscles antagonistes. Si le mouvement est plus complexe, les centres nerveux intègrent à chaque instant la totalité des messages issus de tous les muscles mis en jeu afin d'en extraire, par exemple, les paramètres de la trajectoire de l'extrémité du segment mobilisé.

Chacune de nos attitudes et chacun de nos mouvements engendre ainsi un message sensoriel spécifique. Un «paysage sensoriel» propre à chacun de nos actes se dessine alors et c'est probablement dans le stockage central de ces paysages sensoriels qu'il faudrait rechercher une part de la mémoire motrice, mémoire des gestes intentionnels que nous avons appris.

L'illusion du mouvement

Au début des années 1970, Guy Goodwin et ses collaborateurs de l'Université d'Oxford, puis Göran Eklund, de l'Université d'Uppsala, et enfin nous-

mêmes avons observé que l'application de vibrations mécaniques sur un tendon musculaire crée, chez un sujet totalement immobile et dont la vision est occultée, une sensation de mouvement. Les fuseaux neuromusculaires sont sensibles, nous venons de le voir, aux allongements des muscles qui les abritent. Des vibrations mécaniques de faible amplitude, lorsqu'elles sont appliquées sur les tendons de ces mêmes muscles, engendrent une série d'étirements rapides et répétés du tissu musculaire. David Burke, à l'Université de Sydney, puis nous-mêmes, dans les années 1980, avons démontré, grâce à des enregistrements directs de l'activité de fibres sensorielles issues des fuseaux neuromusculaires, que les vibrations tendineuses stimulent spécifiquement les terminaisons nerveuses sensibles à l'allongement des muscles, et que la fréquence des signaux émis par chaque fibre est, jusqu'à environ 100 hertz, proportionnelle à celle du stimulus vibratoire.

Les vibrations du tendon constituent alors un leurre sensoriel grâce auquel on induit, en l'absence de mouvement, des messages qui ne sont normalement émis vers le cerveau que lorsque le sujet bouge réellement. Ces sensations illusoire de mouvement concernent les membres ou le corps tout entier selon les muscles stimulés et leur nombre, et leur vitesse est toujours relativement lente (rotation d'une articulation de 5 à 20 degrés par seconde). Elles sont par ailleurs si réalistes qu'un sujet naïf attribue à l'expérimentateur la responsabilité du mouvement qu'il perçoit. Le sujet ressent toujours que le muscle vibré est étiré : bien que les messages sensoriels de tous les muscles soient simultanément pris en compte par le cerveau, ceux émis par les muscles étirés sont prépondérants.

L'existence de ces illusions de mouvement démontre que les messages musculaires sont une source prioritaire de notre perception des positions et des mouvements du corps, sur laquelle est fondée la représentation de celui-ci. En outre, la sensibilité musculaire peut assurer des fonctions mentales de haut niveau, telles la reconnaissance de formes et leur catégorisation. Avec Jean-Claude Gilhodes, nous avons donné à des sujets dont la main était totalement immobile l'illusion qu'ils dessinaient différentes formes géométriques (voir la figure 4). En variant la fréquence, la date d'intervention et

la durée des vibrations appliquées aux quatre groupes musculaires du poignet, nous avons créé des sensations de dessin de droites d'orientation variée et de figures géométriques (carrés, rectangles, triangles, cercles ou ellipses).

Ainsi, la vibration isolée des muscles fléchisseurs de la main évoque une sensation de mouvement de celle-ci vers le haut, et celle des adducteurs une sensation de mouvement de la main vers la gauche (pour la main droite), orthogonale à la précédente. La stimulation conjointe de ces deux muscles crée l'illusion d'un seul mouvement, de direction intermédiaire aux deux précédents : en oblique, vers le haut et vers la gauche.

Les sujets reconnaissent et nomment sans difficulté les formes qu'ils ont l'illusion de dessiner : le cerveau intègre donc des messages musculaires multiples, afin d'en extraire perceptivement une forme motrice unique. Nous décrivons cette intégration à l'aide de vecteurs. Chaque muscle engendre, au cours de l'exécution d'un mouvement, un message sensitif à l'origine de ce que l'on pourrait appeler une sensation élémentaire, que nous représentons par un vecteur dont l'origine est l'extrémité du segment mobilisé, dont la direction est celle du mouvement qui allongerait ce muscle et dont la longueur est fonction de la vitesse du mouvement. Lorsque plusieurs muscles sont stimulés en même temps, toutes les sensations élémentaires sont « combinées » en une seule par le système nerveux. Le vecteur somme de tous les vecteurs correspondant aux sensations élémentaires, issus de chacun des muscles concernés, décrit à chaque instant la direction et la vitesse de la trajectoire perçue.

Or, on a découvert, chez le singe, des populations cellulaires situées dans les aires corticales pariétales postérieures qui codent les caractéristiques cinématiques du mouvement sous forme vectorielle. Ces aires sont abondamment innervées par des fibres d'origine musculaire dont la distribution sur le cortex présente des analogies avec l'organisation du corps lui-même : il est donc tentant de considérer que c'est dans ces aires cérébrales que le traitement des messages musculaires permet l'émergence de nos sensations de mouvement. Cette analyse rejoint, au moins pour l'action, ce qu'écrivait Maurice Merleau-Ponty en

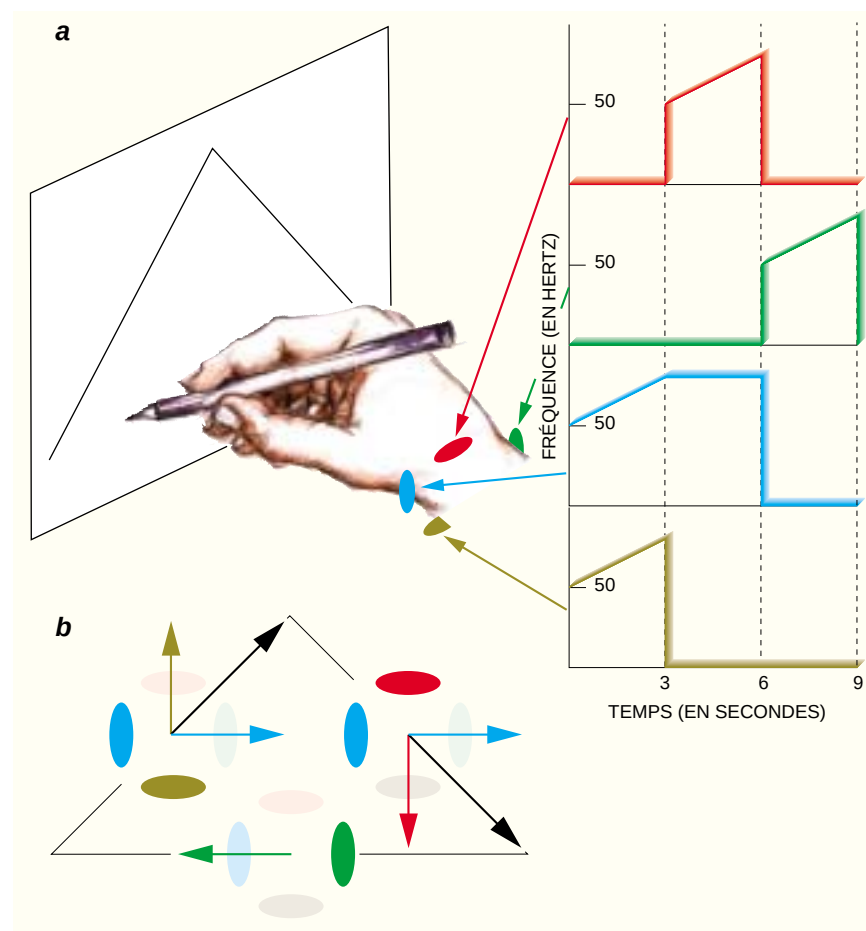
1945 : « L'esprit n'est pas ce qui descend dans mon corps mais ce qui en émerge. »

Nous voyons avec nos muscles

Au delà de sa contribution à la connaissance de soi, la sensibilité des muscles participe à l'exploration de l'environnement grâce aux actions que nous réalisons. Les « actions perceptives », qui orientent et guident nos organes des sens vers leur stimulus, influencent profondément le traitement des messages sensoriels : ainsi, le système nerveux central traite-t-il conjointement les informations visuelles et les informations musculaires nécessairement associées à l'action de voir. Comment pourrions-nous localiser une cible visuelle dans l'espace sans que le système nerveux soit précisément informé du lieu où se trouve le corps et, notam-

ment, l'œil ? James Lackner, de l'Université de Brandeis, l'a démontré en plaçant, dans l'obscurité, une lumière à l'extrémité du doigt immobile d'un sujet, puis en stimulant par vibration les muscles triceps ou biceps du bras correspondant : en même temps qu'il ressent un mouvement de son bras, le sujet a l'illusion que la lumière se déplace vers lui ou s'éloigne de lui.

En outre, la sensibilité musculaire peut influencer l'interprétation par le cerveau de ce que nous voyons sans que nous percevions aucun mouvement. Avec Régine Roll et Jean-Luc Velay, nous avons présenté une cible ponctuelle immobile sur un écran en face des yeux d'un sujet immobile. La vibration des muscles inférieurs des yeux, de la partie antérieure du cou ou même des chevilles (qui, lorsque le sujet a les yeux bandés, lui donne l'illusion d'un basculement vers l'arrière) donne au sujet l'illusion d'un déplacement de la cible



4. LE TRACÉ VIRTUEL d'un dessin, ici un triangle, est ressenti par une personne dont on stimule par vibration les différents muscles du poignet en suivant une séquence bien définie (a). Le sujet reconnaît la forme tracée : le cerveau interpréterait perceptivement les signaux émis par les différents muscles comme des vecteurs, dont l'origine est l'extrémité de la main, dont la direction est perpendiculaire au muscle vibré et dont la longueur est proportionnelle à la vitesse du mouvement (b). La direction globale du mouvement à un instant donné correspond à la somme de tous ces vecteurs.

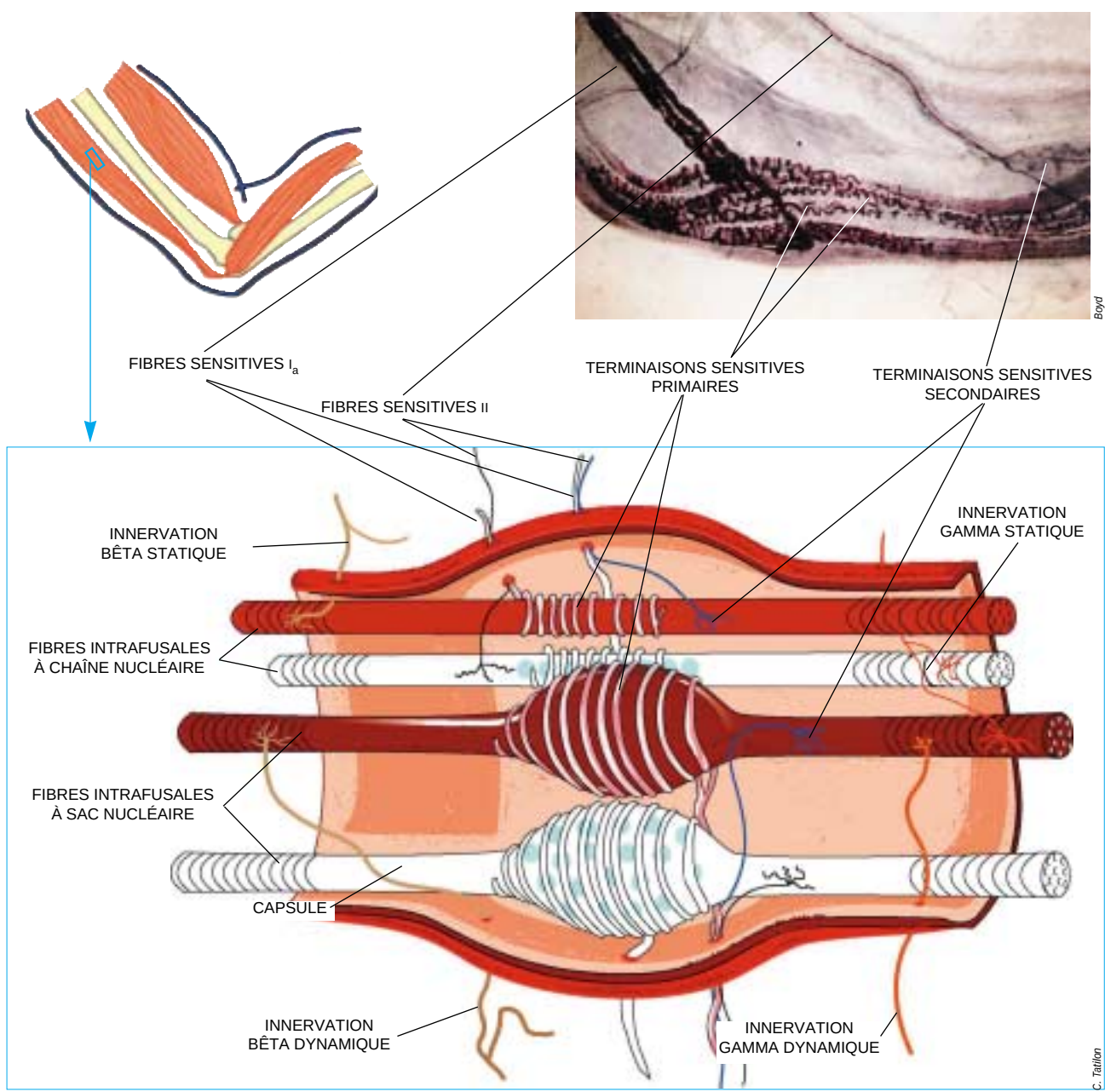
Les capteurs musculaires

Les fibres musculaires sensibles, dites fibres intrafusales, sont regroupées en fuseaux à l'intérieur des muscles. Leur partie centrale, renflée, est entourée d'une capsule qui contient un liquide visqueux. Les noyaux cellulaires (*en bleu sur le dessin*), regroupés dans la partie équatoriale, sont disposés de deux façons : à la manière des grains d'un chapelet (fibres à chaîne nucléaire) ou sous la forme d'un amas central (fibres à sac nucléaire). Au contraire des fibres musculaires motrices, entièrement contractiles, les fibres intrafusales ne peuvent se contracter qu'à leurs extrémités.

Ces fibres intrafusales sont innervées par deux types de terminaisons nerveuses sensibles : les terminaisons primaires entourent leur zone équatoriale à la manière d'anneaux spiralés ; les terminaisons secondaires forment des contacts en arborisations spiralées ou en bouquets près des zones équatoriales des fibres intrafusales.

Des fibres nerveuses dites I_a , de grand diamètre et dans lesquelles l'influx nerveux se déplace à grande vitesse (100 à 120 mètres par seconde) sont issues des terminaisons primaires ; des fibres II, dont la vitesse de conduction est plus faible (50 à 70 mètres par seconde) proviennent des terminaisons secondaires (la photographie montre ces structures, grossies environ 130 fois, dans une coupe musculaire de chat). Les terminaisons primaires indiquent mieux les changements de longueur du muscle que les terminaisons secondaires, plus sensibles aux états statiques.

Les extrémités des fibres intrafusales, qui peuvent se contracter, portent des terminaisons nerveuses issues de neurones moteurs. Leur activation augmente la sensibilité des terminaisons primaires et secondaires à la détection des longueurs (innervation gamma et bêta statique) ou à la détection des variations de longueur (innervation gamma et bêta dynamique).



vers le haut. Si, dans ces mêmes conditions, on demande au sujet de pointer la cible du doigt, il commet une erreur de localisation, dont la direction et l'amplitude varient avec les muscles vibrés et la fréquence de la vibration. Enfin, quand les muscles oculaires externes des deux yeux sont vibrés simultanément, le sujet a l'impression que la cible se rapproche de lui : les messages évoqués simulent ceux qui sont normalement associés à la convergence des yeux lorsque nous suivons du regard un objet qui se rapproche de nous.

À l'appui de cette description, Yves Trotter, de l'Université de Toulouse, a récemment observé, chez le singe, que l'activité de certains neurones du cortex visuel dépend de l'angle de convergence des deux yeux. Des messages provenant des récepteurs sensoriels des muscles extra-oculaires arriveraient donc directement dans le cortex visuel et contribueraient à la représentation des distances et du monde en trois dimensions.

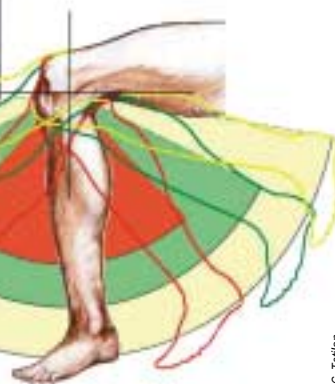
La rétine est portée par un ensemble de segments corporels mobiles et emboîtés que sont successivement l'œil, la tête, le tronc et les jambes : les signaux proprioceptifs, issus de toute la chaîne des muscles mobilisant ces segments, «disent» à tout instant au cerveau quelle est l'attitude ou quels sont les mouvements du corps, et lui permettent le calcul de la position absolue de la rétine dans l'espace. L'ensemble des informations issues des muscles, des pieds qui ancrent le corps sur le sol à ceux des yeux, qui ouvrent le corps sur le monde, (qu'avec R. Roll nous avons nommé «chaîne proprioceptive») est indispensable à la connaissance, à chaque instant, de notre position dans l'espace.

Nous touchons avec nos muscles

La sensibilité musculaire est aussi associée à la sensibilité cutanée. D'abord, elle constitue l'un des fondements du toucher actif. Ensuite, des illusions révèlent de nombreuses interactions entre informations tactiles et informations musculaires. Ainsi, lorsque la main d'un sujet est libre de tout contact, la vibration de ses muscles fléchisseurs évoque une sensation d'extension de celle-ci. Si le sujet est debout, le bras horizontal dans le plan du corps, la main posée à plat contre un mur, les doigts horizontaux, la même vibration évoque une sensation d'inclinaison du corps entier,



5. L'AMPLITUDE DU MOUVEMENT de rotation de la jambe autour du genou (en jaune, amplitude normale) est réduite de moitié (en rouge) après une immobilisation prolongée dans un plâtre. L'application, trois fois par semaine, de vibrations mécaniques sur les tendons des muscles situés de part et d'autre de cette articulation, à travers des fenêtres ménagées dans le plâtre (photographie), en créant des sensations de mouvement de la jambe, permet que l'amplitude de la rotation atteigne 80 pour cent (en vert) dès l'ablation du plâtre. Les illusions de mouvement aideraient le cerveau à conserver en mémoire une «image» du mouvement, qu'il a tendance à oublier pendant l'immobilisation.



dans une direction qui dépend de l'orientation de la main sur le mur : vers l'avant si les doigts le sont aussi, et vers l'arrière dans le cas contraire.

Comme pour la vue, un même message sensoriel d'origine musculaire est interprété par le système nerveux de manière différente selon le contexte dans lequel il est reçu et analysé : ici, en fonction de la posture du sujet et des informations tactiles qui lui sont associées. Cette caractéristique est probablement l'une des bases de la traduction des messages sensitifs en informations utilisables par le cerveau.

L'association, par le cerveau, des diverses informations qui lui parviennent conduit aussi parfois à de curieuses sensations. Ainsi, J. Lackner a appliqué une vibration sur le muscle biceps de sujets aux yeux bandés auxquels il avait demandé de se pincer le nez entre le pouce et l'index. Après quelques secondes, la majorité des sujets, à l'instar de Pinocchio, ont senti que leur nez s'allongeait, jusqu'à atteindre, chez certains d'entre eux, une trentaine de centimètres (voir la figure 2)... Quelques autres sujets sentaient un allongement de leurs doigts et de leur nez ; d'autres enfin, seulement de leurs doigts. Un message issu du muscle biceps indiquait au système nerveux que le bras s'étendait, alors que le contact tactile entre les doigts et le nez restait constant : les systèmes de traitement cérébraux se sont accordés sur

l'interprétation la plus plausible, bien qu'étrange, permettant de concilier ces deux messages contradictoires.

En interagissant avec les informations tactiles, la sensibilité musculaire code aussi les déplacements de la totalité du corps dans l'espace. Un paraplégique assis dans un fauteuil roulant se déplace en agissant sur les roues latérales par des mouvements alternés de flexion et d'extension des bras. Nous avons immobilisé le fauteuil et nous avons demandé au patient de poser ses deux mains sur les roues, puis nous avons stimulé, par vibration, alternativement les muscles biceps et triceps des deux bras : le patient rapporte une puissante sensation de déplacement vers l'avant de lui-même et de son fauteuil roulant. De la même façon, une personne valide assise sur une chaise de bureau à roulettes sent son corps se déplacer vers l'arrière avec la chaise si l'on stimule les muscles normalement allongés lors d'une extension des jambes.

Ces illusions de mouvement, où les sensibilités musculaire, visuelles et tactiles interagissent, montrent que l'interprétation par le cerveau des informations neuromusculaires dépend de la posture corporelle et des interactions avec l'environnement. L'une des contraintes environnementales les plus présentes sur Terre est la gravité : dès la naissance, le dialogue entre le corps, le cerveau et l'environnement intègre cet invariant physique. Le système ner-

veux met en place avec difficulté, au cours des premières années de la vie, les puissants mécanismes réflexes qui permettent à l'individu de se tenir debout, en luttant contre la gravité, et les mécanismes perceptifs qui l'informent sur la posture de son corps par rapport à la verticale.

Le cerveau s'adapte à la gravité

Que se passe-t-il lorsque cette référence fondamentale est supprimée ? Les vols spatiaux habités, qui placent le corps en microgravité, où se tenir ou savoir que l'on est debout perd tout sens, révèlent que le cerveau apprend à reconnaître un corps devenu non pesant et désorienté, et reconstruit, en tenant compte des nouvelles propriétés biomécaniques du corps, la quasi-totalité des commandes nerveuses motrices. Il réaffecte aussi les signaux sensoriels à la gestion des nouvelles habiletés motrices acquises par le corps.

Avec R. Roll et J.-C. Gilhodes, et avec nos collègues russes Konstantin Popov et Victor Gurfinkel, du Laboratoire des contrôles moteurs de Moscou, nous avons étudié les modifications des sensations posturales du corps et des réflexes d'équilibration, au cours de séjour en microgravité de spationautes français (du Centre national d'études spatiales) et russes dans la station orbitale *MIR*. Au sol, on crée, par vibration tendineuse des muscles de la cheville d'un sujet debout, des illusions d'inclinaison du corps ou des ajustements posturaux orientés vers l'avant ou vers l'arrière. Or, après seulement quelques jours passés en microgravité, les illusions de mouvement du corps et la régulation de la posture debout sont considérablement atténuées, voire supprimées.

En revanche, les astronautes rapportent qu'ils apprennent à utiliser leurs pieds pour propulser leur corps d'un point à l'autre de la station orbitale ou pour le stabiliser lorsqu'ils ont des mani-

pulations précises à effectuer. Ces nouveaux apprentissages moteurs donnent une nouvelle signification aux messages en provenance des muscles de la cheville : après environ une semaine en microgravité, la vibration des deux muscles jambiers antérieurs, qui, sur Terre, donne au sujet l'illusion que son corps s'incline vers l'arrière, crée une illusion de déplacement de l'ensemble du corps suivant son axe longitudinal.

Pour des séjours brefs ou de moyenne durée dans l'espace, le nouveau modèle interne du corps, construit sur la base des actions apprises en microgravité, coexiste avec le modèle antérieur adapté à la gravité. En restituant artificiellement en orbite, à l'aide de puissants tendeurs élastiques, des informations de résistance à la gravité sous la plante des pieds et dans les muscles des jambes, l'illusion qui prévalait sur Terre réapparaît, ainsi que les réponses motrices qui régulaient la posture avant le vol.

Ces expériences sont aussi l'occasion de vérifier que la connaissance intime que nous avons de notre corps dépend de notre environnement. Lorsqu'on les interroge, au retour d'un séjour de plusieurs semaines dans la station *MIR*, la plupart des spationautes déclarent préférer leur corps pesant et orienté dans le champ de gravité terrestre à celui dépourvu de poids et libéré des contraintes de la pesanteur. L'expression de cette préférence ne traduirait-elle pas une certaine expérience de dissociation passagère entre le corps et la représentation que nous nous en faisons, le résultat de l'action étant différent de celui que nous attendons, comme cela se produit lors d'atteintes neurologiques ? Privé des références fondamentales grâce auxquelles il se reconnaît en permanence, le corps renvoie de lui-même une image incertaine qui conduit momentanément le sujet à douter de son appartenance à ce même corps. Comment habiter un corps imprévisible ? Cette « incertitude corporelle » disparaît toutefois lors des séjours assez longs et le corps apprend à être et à se mouvoir dans ce nouvel environnement et, ce faisant, permet au spationaute de s'y « réincarner » pleinement.

Entretenir l'illusion, à défaut de mouvement

Sur Terre même, les ensembles neuro-
naux de l'écorce cérébrale se modifient en permanence au cours de nos

Le contrôle moteur de la sensibilité des récepteurs musculaires

Les fibres musculaires intrafusales, qui portent les terminaisons nerveuses sensibles à la longueur et à l'allongement des muscles, reçoivent aussi sur leurs extrémités contractiles une innervation motrice. Certains axones provenant de petits neurones moteurs (motoneurones gamma) se terminent exclusivement sur les extrémités des fibres intrafusales : c'est l'innervation fusimotrice gamma. D'autres, provenant de motoneurones plus grands, innervent à la fois les fibres musculaires intrafusales et les fibres musculaires squelettiques : c'est l'innervation squeletto-fusimotrice bêta, découverte au laboratoire d'Yves Laporte, à Toulouse, dans les années 1960.

La stimulation de ces motoneurones, gamma ou bêta, entraîne une contraction des extrémités des fibres intrafusales. Celle-ci active les terminaisons sensorielles du fuseau neuromusculaire et exacerbe leurs réponses à leur stimulus habituel. La stimulation des motoneurones bêta entraîne aussi la contraction des fibres musculaires extrafusales, ce qui a pour conséquence d'adapter automatiquement la sensibilité du capteur sensoriel à la nouvelle longueur du muscle. On distingue en outre des motoneurones gamma et bêta statiques et dynamiques, selon que leur activation sensibilise les terminaisons nerveuses sensibles à la

détection préférentielle des longueurs ou des allongements musculaires.

De nombreux travaux ont par ailleurs montré que les neurones fusimoteurs et squeletto-fusimoteurs subissent des contrôles très divers d'origine sensorielle ou cérébrale. Avec Edith Ribot et Jean-Pierre Vedel, nous avons directement enregistré l'activité de motoneurones gamma chez l'homme : elle est quasi permanente en condition de repos, et ces motoneurones sont très sensibles à des événements de type émotionnel, qu'ils proviennent du sujet lui-même ou de son environnement, telle l'occurrence d'un bruit inopiné.

Ce résultat accrédite l'idée que nos états mentaux ont des conséquences sur la disponibilité de nos muscles vis-à-vis des commandes intentionnelles. Il constitue, en outre, le support neurobiologique d'un ensemble d'observations empiriques selon lesquelles nos postures et nos mouvements sont le reflet de nos états mentaux. Ces données renforcent enfin la théorie des « marqueurs somatiques », proposée par la psychophysiologie et réactualisée récemment sur la base d'observations neuropsychologiques par Hanna et Antonio Damasio, selon laquelle le fonctionnement de la plupart de nos organes, et notamment de ceux constituant notre système moteur, porterait l'empreinte directe de nos émotions.

apprentissages successifs, après la disparition accidentelle d'une partie du corps ou, plus banalement, lorsqu'un membre est immobilisé durablement. Ainsi, après l'ablation du plâtre qui immobilisait un membre, à la suite d'une fracture osseuse ou d'une entorse, une longue période de rééducation est nécessaire pour que les mouvements du membre retrouvent leur amplitude antérieure. Cette ankylose articulaire est en général imputée à des difficultés biomécaniques périphériques affectant les tissu articulaire et musculaire. Mais nous avons montré, avec Henri Neiger, de l'Université de Rennes, et J.-C. Gilhodes, qu'elle est aussi en partie d'origine cérébrale : l'immobilité d'un membre prive le système nerveux central de toutes les informations sensorielles habituellement associées à sa mobilisation et «efface», dans le cerveau, l'image même du mouvement.

Nous avons mis au point un traitement qui réduit, voire supprime, l'ankylose dès l'ablation du plâtre, en entretenant la mémoire du mouvement dans le cerveau des patients à l'aide d'illusions (voir la figure 5). Des fenêtres sont ménagées dans le plâtre par le chirurgien à hauteur des tendons musculaires, et l'on applique, plusieurs fois par semaine, des stimulation vibratoires alternativement sur les muscles agonistes et antagonistes. On crée ainsi de puissantes sensations de mouvement du membre immobilisé, qui entretiennent l'activité des récepteurs musculaires, des voies sensitives et des structures centrales chargées d'accueillir et de traiter ces messages.

Avec Philippe Lacert et Christine Redon, à l'Hôpital de Garches, nous avons utilisé la même méthode pour «apprendre» de nouvelles postures

aux muscles et au cerveau. La stimulation, par vibration, des muscles quadriceps a permis d'obtenir de spectaculaires redressements de l'ensemble tête-tronc chez certains enfants infirmes moteurs cérébraux souffrant de troubles posturaux. Après plusieurs mois, l'«image» de cette nouvelle posture semble ancrée dans le système nerveux des enfants, qui la conservent en l'absence de stimulation. Le redressement et la meilleure stabilisation de l'ensemble tête-tronc redonne à la vision de ces enfants son rôle d'exploration de l'environnement et de guidage du geste, et leur permet une meilleure maturation perceptive, et motrice.

Enfin, la restitution au corps de sensations associées à des mouvements oubliés par le cerveau ou inconnus de lui laisse entrevoir d'autres applications séduisantes : on faciliterait par exemple l'apprentissage de gestes sportifs ou techniques. Sur un mode plus ludique, la manipulation du sens musculaire augmenterait fortement le réalisme des installations de réalité virtuelle, limitées actuellement à la vue, à l'ouïe et au toucher : en plus d'un visio-casque et d'un gant tactile à retour d'effort, pourquoi ne pas équiper les explorateurs de ces mondes numériques de vibreurs placés sur les tendons musculaires ? Leur activation coordonnée sur les divers muscles permettrait, par exemple, lors d'une promenade virtuelle sur le lac du Bourget, de voir le lac et ses environs, d'entendre le clapotis de l'eau, mais aussi de ramer virtuellement. Pour rejoindre le débarcadère qui se trouve à droite, il suffirait alors de stopper les vibreurs du bras droit, puis du bras gauche. Il ne reste plus qu'à débarquer...

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

**Des cailloux
dans les choses sûres**



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 65 F

Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 114

Jean-Pierre ROLL est professeur à l'Université d'Aix-Marseille I et dirige le Laboratoire de neurobiologie humaine, UMR 6562 du CNRS.

O. SACKS, *L'homme qui prenait sa femme pour un chapeau*, Éditions du Seuil, 1988.

R. ROLL, J.-L. VELAY et J.-P. ROLL, *Eye and Neck Proprioceptive Messages Contribute to the Spatial Coding of Retinal Input in Visually-oriented Activities*, in *Experimental Brain Research*, vol. 85, pp. 423-431, 1991.

J.-P. ROLL et R. ROLL, *Le sentiment d'incarnation : arguments neurobiologiques*, in

Revue de médecine psychosomatique, vol. 35, pp. 75-90, 1993.

J.-P. ROLL, *Sensibilités cutanées et musculaires*, in *Traité de psychologie expérimentale*, sous la direction de M. Richelle, J. Requin et M. Roberts, Presses Universitaires de France, pp. 483-542, 1994.

A. DAMASIO, *L'erreur de Descartes*, Éditions Odile Jacob, 1996.

S.C. GANDEVIA, *Kinaesthesia : Role for Afferent Signals and Motor Commands*, *Handbook of Physiology*, 1996.

J. RIVOLER, *L'homme dans l'espace*, Presses Universitaires de France, 1997.

