

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