

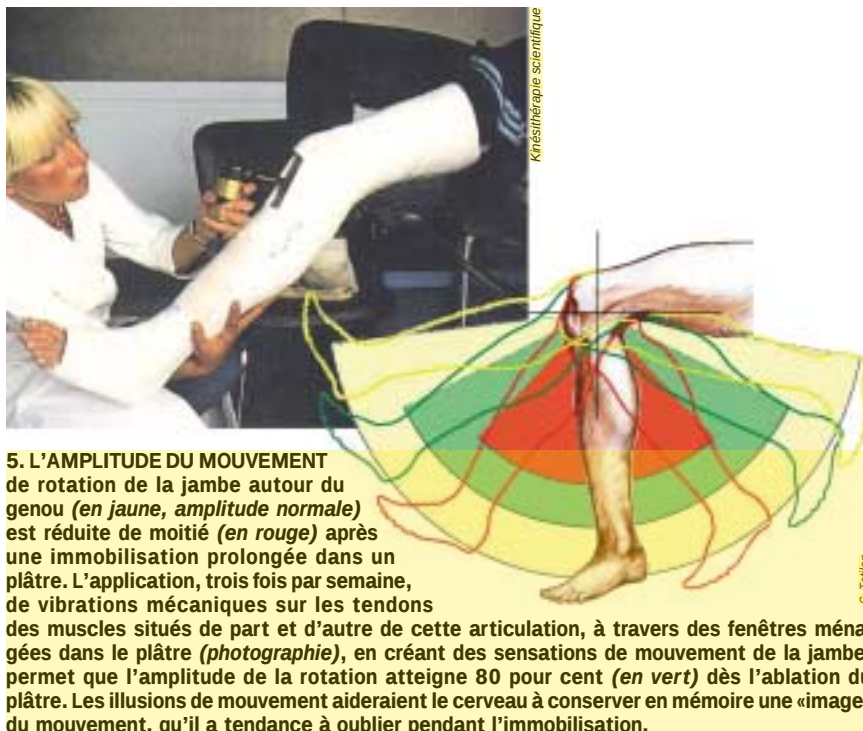
vers le haut. Si, dans ces mêmes conditions, on demande au sujet de pointer la cible du doigt, il commet une erreur de localisation, dont la direction et l'amplitude varient avec les muscles vibrés et la fréquence de la vibration. Enfin, quand les muscles oculaires externes des deux yeux sont vibrés 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.