

réduction du volume vasculaire qui s'ensuit provoquent une surabondance de globules rouges. Le corps, en réaction, arrête la production de globules rouges et détruit ceux qui sont en excès.

Les muscles et les os sont parfois gravement perturbés par les effets de l'apesanteur : quelle que soit la durée du séjour dans l'espace, les spationautes reviennent toujours avec une masse

musculaire et une masse osseuse réduites. Pourquoi cet effet ? Parce que les forces qui s'exercent sur les éléments structuraux de l'organisme diminuent considérablement. L'absence

Orientation spatiale en apesanteur

La gravité est omniprésente sur la Terre. Elle est une accélération dirigée vers le centre de la Terre qui détermine notre posture, notre équilibre et la plupart de nos mouvements. On estime qu'environ 60 pour cent des muscles de notre corps s'opposent à la gravité. Leur commande nécessite que le système nerveux connaisse à tout moment l'inclinaison du corps par rapport à la gravité.

L'appareil vestibulaire de l'oreille interne contient des récepteurs sensoriels, les otolithes, sensibles aux accélérations linéaires, telles que la gravité. Les otolithes sont de petits cristaux de carbonate de calcium qui reposent sur des cellules sensorielles reliées au cerveau. Quand la tête est inclinée par rapport à l'axe vertical, le glissement de ces cristaux stimule les cellules sensorielles, et le système nerveux central en déduit l'angle d'inclinaison de la tête.



Dans le Spacelab de la navette spatiale, un spationaute assis au bout du bras d'une centrifugeuse tourne à 42 tours par minute. La force centrifuge, équivalente à 1 g, qui le plaque sur le côté gauche, est perçue comme une gravité artificielle et lui donne l'illusion d'être couché sur le côté. Devant son visage, un écran d'ordinateur et des caméras vidéo enregistrent les mouvements de ses yeux.

Cependant, les otolithes se déplacent également sur les cellules sensorielles lorsque nous effectuons un mouvement de translation horizontal ou vertical. Dans ce cas, les otolithes glissent, en raison de leur inertie, dans la direction opposée à celle du mouvement. L'information délivrée au cerveau par les cellules sensorielles est donc ambiguë : le déplacement des otolithes est dû soit à une inclinaison, soit à une translation.

Comment, dans l'obscurité, sans références visuelles, le cerveau distingue-t-il une inclinaison de la tête d'un mouvement de translation ? En apesanteur, seules les translations de la tête mettent les otolithes en mouvement. Si l'on communique une accélération linéaire à la tête des spationautes, cette accélération sera-t-elle interprétée par le cerveau comme la conséquence d'une inclinaison ou d'une translation de la tête ?

Cette question était à l'origine des expériences effectuées à bord de la navette spatiale, lors de la mission NEUROLAB STS-90, en avril 1998. L'accélération linéaire était produite par une centrifugeuse. Ce système, mis au point par l'Agence spatiale européenne et par la Société *Aérospatiale*, comprend un siège situé au bout d'un bras de 50 centimètres, qui tourne à environ 42 tours par minute, engendrant une accélération centrifuge de 1 g équivalente à la gravité terrestre, mais cette fois-ci horizontale. Les sujets sont placés dans l'obscurité, de sorte que le cerveau dépende uniquement des informations de l'oreille interne pour détecter le mouvement.

Sur la Terre, à la mise en route de la centrifugeuse, les sujets ont généralement la sensation d'un mouvement de rotation pendant à peine une minute. Cette sensation est due à la stimulation d'un autre type de récepteurs situés dans l'oreille interne, les canaux semi-circulaires. Ces canaux ne sont plus stimulés lorsque la rotation atteint une vitesse constante. Au contraire, les otolithes sont stimulés en permanence lors de la centrifugation, à la fois par la force gravitationnelle, verticale, et par la force centrifuge, horizontale. La somme de ces forces est oblique ; le cerveau interprète faussement qu'il s'agit de la gravité. Comme la gravité est naturellement alignée avec la verticale, le cerveau déduit des signaux reçus de l'oreille interne que le corps est incliné de 45 degrés par rapport à la gravité (voir la figure de la page ci-contre, à gauche). Quand on mesure les mouvements oculaires pendant la centrifugation, on constate une rotation des globes oculaires dans la direction opposée à l'inclinaison perçue, comme si le cerveau tentait de compenser la rotation de l'image visuelle sur la rétine suite à une inclinaison.

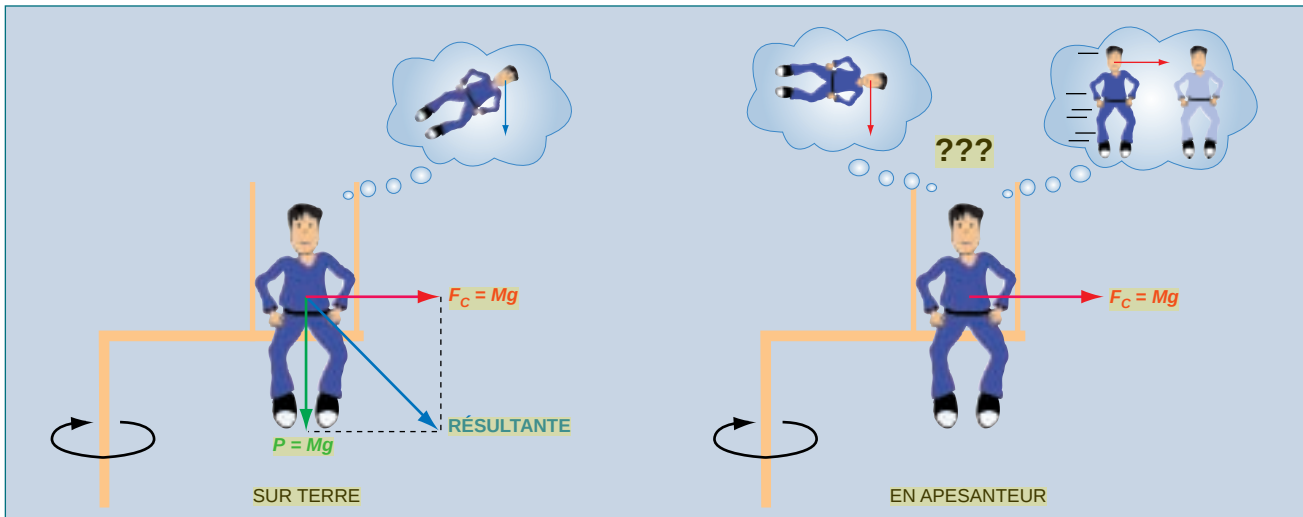
La trajectoire orbitale de la navette est physiquement comparable à une chute libre. Par conséquent, la force gravitationnelle n'est pas détectée par les récepteurs

de compression sur la colonne vertébrale augmente la taille des individus d'environ cinq centimètres. La plupart des organes n'ont plus de poids. La cage thoracique se relâche et se dilate. Les

organes abdominaux semblent flotter ; les spationautes contractent parfois leur abdomen, afin de les remettre en place.

Les muscles squelettiques, qui commandent les mouvements des dif-

férentes parties de notre corps, constituent le tissu le plus abondant de l'organisme. Ils sont adaptés à la position verticale, mais, dans l'espace, ils n'ont plus d'utilité. Par conséquent, certains



La rotation à vitesse angulaire constante engendre une force centrifuge (F_c), égale à la force gravitationnelle terrestre, au bout du bras de la centrifugeuse. Sur la Terre, le cerveau interprète la résultante de cette force centrifuge et de la force gravitationnelle

(P) comme étant verticale et le sujet a la sensation d'être incliné à 45 degrés sur sa gauche. En apesanteur, la force centrifuge peut être perçue comme une inclinaison à 90 degrés sur le côté gauche ou comme une translation continue vers la droite.

otolithiques. En apesanteur, dans la navette, sur la centrifugeuse en rotation, les otolithes des spationautes ne sont stimulés que par la force centrifuge. Comment cette grandeur physique sera-t-elle interprétée par le cerveau : une inclinaison du corps sur le côté gauche ou une translation horizontale du corps sur la droite ?

Au cours de l'expérience effectuée lors de la mission NEUROLAB, on a demandé à quatre spationautes de décrire l'orientation et le mouvement perçus lors de la centrifugation dans l'obscurité. Les mouvements de leurs yeux étaient enregistrés par des caméras vidéo en lumière infrarouge. Le deuxième jour du vol, les astronautes ont eu la sensation d'être inclinés à 45 degrés sur le côté pendant la centrifugation, comme sur la Terre. Cependant, dès le cinquième jour du vol spatial et jusqu'à la fin de la mission de 16 jours, ils se sont sentis inclinés à 90 degrés sur le côté. Jamais ils n'ont eu la sensation d'un mouvement de translation. L'enregistrement des mouvements oculaires pendant la centrifugation a montré que, comme sur la Terre, leurs yeux effectuaient un mouvement de rotation pour tenter de compenser cette inclinaison perçue. Tout se passe donc comme si, en apesanteur, le cerveau interprétait l'accélération, linéaire et continue engendrée par la centrifugeuse, comme une gravité artificielle.

Ces résultats indiquent que le cerveau a besoin d'une référence constante, liée à l'environnement du corps. La vision de l'environnement, lorsqu'elle est disponible, est prépondérante dans la détermination de la position du corps dans l'espace. Elle l'est plus encore en apesanteur, où le «haut» et le «bas» n'existent plus. En complément des repères visuels extérieurs, et à plus forte raison en leur absence, la

référence utilisée sur la Terre est la gravité, omniprésente. Cependant, la gravité n'est plus détectée en apesanteur, et le cerveau doit extraire de l'environnement une nouvelle grandeur pertinente qui servira de référence.

Ces résultats qui éclairent les mécanismes fondamentaux de l'orientation spatiale devraient permettre un meilleur traitement des troubles de l'équilibre, lors de la locomotion, par exemple ; ils offrent des perspectives intéressantes pour les vols habités de très longue durée. Quand des astronautes iront sur Mars, la mission spatiale durera plusieurs mois, voire plusieurs années. Or l'absence du stress imposé par la gravité sur les os et sur les muscles s'accompagne d'une décalcification osseuse et d'une fonte de la masse musculaire, comme cela est le cas chez les spationautes lors de leurs séjours prolongés à bord de la station *Mir*. Ces modifications physiologiques compromettront sans doute l'efficacité des équipages sur la surface de Mars, puis leur réadaptation à la gravité terrestre. Contre ces phénomènes, des agences spatiales ont proposé l'utilisation de la centrifugation à bord des véhicules spatiaux. Elles ont abandonné l'idée de véhicules spatiaux en rotation sur eux-mêmes, comme la station spatiale de 2001, *l'Odysée de l'espace*. Cependant, l'exposition régulière des spationautes à une accélération linéaire continue, grâce à une centrifugeuse embarquée de petit diamètre, semble plus réaliste. Dans cette perspective, nos résultats sont encourageants : ils montrent que l'accélération linéaire produite par une centrifugeuse est bien interprétée en apesanteur comme une gravité artificielle.

Gilles CLÉMENT
Centre de recherche Cerveau et Cognition, Toulouse

d'entre eux s'atrophient rapidement. Simultanément, la nature des muscles évolue ; certaines fibres à contraction lente, nécessaires face à la gravité, se transforment en fibres à contraction rapide. Les spationautes ne sont pas gênés tant que les travaux restent légers. Toutefois, de nombreuses expérimentations sont en cours sur l'atrophie des muscles requis pour des travaux pénibles au cours des sorties dans l'espace, et leur préservation pour un retour en bonne forme sur terre.

Le métabolisme osseux évolue également. L'os, l'un des matériaux biologiques le plus résistants connus, est un tissu dynamique : certaines cellules, les ostéoblastes, produisent l'os, tandis que les ostéoclastes le détruisent. Les deux types cellulaires, sensibles à différentes hormones et vitamines présentes dans le sang et aux contraintes mécaniques qui s'exercent sur l'os, assurent normalement l'équilibre des os.

Les matières organiques confèrent à l'os résistance et stabilité, tandis que les matières inorganiques le rigidifient. Le squelette est une réserve de calcium pour l'organisme : il contient 99 pour cent du calcium présent, et sa mise en solution, puis sa répartition dans l'organisme, maintiennent des concentrations stables en calcium, nécessaires au bon fonctionnement des cellules.

Des équipes russes et américaines ont étudié les variations de masses des os dans l'espace. Les pertes concernent surtout les vertèbres inférieures, les talons, les hanches et la partie supérieure des fémurs. Elles sont d'environ un pour cent par mois pendant toute la durée des missions. Le calcium ainsi libéré dans le corps cristallise et provoque parfois des lithiases rénales et une calcification des tissus mous.

De retour sur la Terre, le squelette retrouve son poids initial au bout de quelques mois, mais les médecins ne

savent pas encore si l'os se reconstitue correctement. Cette question est importante, car si la perte osseuse était irréversible, les anciens spationautes auraient toujours un risque de fractures élevé. L'étude d'animaux envoyés dans l'espace indique également que la production d'os diminue pendant le temps du vol.



3. L'ALITEMENT produit des effets physiologiques analogues à ceux de l'apesanteur. Au Centre de recherche Ames de la NASA, des volontaires restent couchés, sur des lits inclinés de six degrés, la tête plus basse que les pieds. Après quelque temps dans cette position, les liquides de l'organisme s'accumulent dans la poitrine et dans la tête, les muscles s'atrophient et les os s'affaiblissent. Les médecins testent divers exercices, régimes et traitements médicamenteux contre ces perturbations physiologiques.



4. JOHN GLENN, spationaute devenu sénateur de l'Ohio, sort d'une maquette d'entraînement de la navette américaine, en 1989. Il voyagera de nouveau dans l'espace à bord de la navette *Discovery* à la fin du mois d'octobre. Le vol spatial exerce sur le corps humain des effets comparables à ceux du vieillissement. J. Glenn, âgé de 77 ans, sera la première personne qui subira les effets des deux facteurs en même temps.

La physiologie osseuse dans l'espace est mal connue parce que, sur la Terre, elle l'est aussi. On ne sait notamment pas encore bien lutter contre l'ostéoporose des femmes après la ménopause. De nombreux facteurs (activité, nutrition, vitamines, hormones) interviennent dans cette perte osseuse, mais on en ignore toujours l'action et les interactions. Cette ignorance retarde la mise au point d'une prévention efficace de l'ostéoporose des femmes ménopausées comme des spationautes. Jusqu'ici, divers types d'exercices ont été testés, mais sans réel succès.

Respiration et collectivité

Les pneumologues ont également bénéficié des études du poumon dans l'espace. Sur la Terre, les débits d'air et de sang diffèrent dans les parties inférieures et supérieures du poumon. Ces différences sont-elles dues à la gravité ou à la nature même du poumon ? John West et ses collègues de l'Université de San Diego, et Manuel Paiva, de l'Université libre de Bruxelles, ont montré que la gravité n'est pas en cause : même en apesanteur, les différentes parties du poumon sont parcourues par des débits différents d'air et de sang.

L'apesanteur n'est pas responsable de toutes les modifications de l'organisme qui apparaissent pendant les vols spatiaux. Ainsi, l'immunodéficience dont souffrent les spationautes est probablement due aux divers stress provoqués par le vol. La quantité et la qualité du sommeil sont également modifiées, parce que les éclairages et les horaires de travail perturbent les rythmes naturels du corps. Un regard par le hublot juste avant le coucher (la beauté du spectacle est une tentation irrésistible) stimule la rétine au point de provoquer une réaction physiologique