

> améliorant le blindage des vaisseaux spatiaux, nous pourrions arrêter une partie de ce rayonnement délétère, mais aucun matériau connu n'est à la fois assez léger pour être transporté en orbite et efficace pour protéger les astronautes. Et nous n'en sommes qu'aux premiers balbutiements dans le développement de médicaments susceptibles de combattre les effets du rayonnement à l'intérieur du corps. À moins que nous ne trouvions une solution qui fonctionne vraiment, le rêve humain de voyager dans le Système solaire et au-delà pourrait rester à jamais hors de portée.

UN BOMBARDEMENT COSMIQUE CONSTANT

Le rayonnement cosmique est pernicieux : nous ne pouvons ni le voir ni le sentir, et pourtant il emplit chaque centimètre cube de ce qui semble être de l'espace vide. Or il peut provoquer des dégâts importants dans les tissus biologiques. Le plus grand danger pour les astronautes est celui des rayons cosmiques d'origine galactique, principalement des noyaux atomiques ionisés (88% d'hydrogène, 9% d'hélium, des traces d'éléments plus lourds, mais aussi des photons) qui se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. Ils sont probablement produits et accélérés dans les supernovæ, de violentes explosions d'étoiles en fin de vie.

À ces rayons cosmiques galactiques qui imprègnent le cosmos de façon quasi uniforme, il faut ajouter les particules du vent solaire et celles des éjections de masse coronale lors des éruptions solaires. Ces particules (également des ions en majorité) sont expulsées à des vitesses comprises entre 300 et 800 kilomètres par seconde pour le vent solaire, et jusqu'à 2500 kilomètres par seconde lors des éjections de masse coronale. Moins énergétiques que les rayons cosmiques galactiques, elles sont cependant plus nombreuses (voir la figure page ci-contre).

Qu'elles soient d'origine solaire ou galactique, ces particules ont assez d'énergie pour traverser la coque des vaisseaux spatiaux et le corps des astronautes. Sur Terre, le champ magnétique de la planète protège les organismes vivants en déviant la plupart de ces particules cosmiques, qui n'atteignent pas le sol. Il s'étend jusqu'à environ 60000 kilomètres d'altitude du côté du Soleil et s'étire bien plus loin du côté « nuit ». Ainsi, les voyages au-delà de cette magnétosphère (la Lune est par exemple située à près de 400000 kilomètres de la Terre) conduisent inévitablement à une exposition accrue aux rayons cosmiques et à leurs interactions avec les tissus humains.

Que se passe-t-il lorsque les ions du rayonnement cosmique traversent le corps humain ? Ils laissent derrière eux une partie de leur

énergie et ionisent des atomes des tissus biologiques, c'est-à-dire qu'ils leur arrachent des électrons. Ces atomes, initialement neutres, se transforment en ions chargés. Ces derniers se propagent à leur tour dans l'organisme, arrachant au passage d'autres électrons à d'autres atomes, ce qui a pour effet d'élargir encore le sillage destructeur. Et plus la particule initiale du rayon cosmique est un ion lourd, plus elle aura d'énergie et plus elle ionisera d'atomes.

L'arrachage des électrons des atomes entraîne la rupture de liaisons moléculaires. Des protéines, des lipides, des acides nucléiques et d'autres molécules vitales des cellules et des tissus du corps sont alors endommagés. Les atomes et les molécules privées de certains de leurs électrons deviennent des radicaux libres, des composants qui deviennent très réactifs et prompts à s'apparier avec des atomes ou des molécules voisines afin de récupérer des électrons et retrouver une configuration plus stable. Ce faisant, les radicaux libres transforment les molécules de l'organisme en nouveaux composés chimiques qui ne remplissent plus la fonction initiale. Quand des radicaux libres rencontrent de l'ADN, par exemple, ils peuvent casser son ossature de sucres et de phosphates, ou endommager les bases d'acides nucléiques.

L'exposition aux radiations est mesurée en termes de « dose absorbée », qui correspond à l'énergie déposée dans le corps (par unité de masse corporelle) par le rayonnement ionisant. Dans le système international, l'unité pour la dose absorbée est le gray (Gy) ; 1 gray correspond à l'absorption de un joule par kilogramme.

La dose absorbée n'est pas le seul critère important. Les scientifiques caractérisent aussi le rayonnement en fonction de la densité d'ionisation qu'il produit par unité de dose. On parle de transfert linéique d'énergie (TLE). Cette grandeur indique la quantité d'énergie transférée au corps au voisinage de la trajectoire (sous la forme d'électrons secondaires arrachés aux atomes) par unité de distance parcourue. Par conséquent, pour une dose donnée, un rayonnement de TLE élevé est plus dangereux que celui de TLE faible, parce qu'il provoque l'ionisation d'un plus grand nombre d'atomes. Mais surtout, à l'échelle moléculaire, les chercheurs observent que les ions lourds et énergétiques ayant un TLE élevé créent des zones de tailles nanométriques riches en radicaux libres où se concentrent les dommages. À l'inverse, les ions légers, mais aussi les photons (tels les rayons X et gamma), produisent peu des zones concentrées de radicaux libres. Dans les zones à forte concentration de radicaux libres, les dégâts sont plus importants et difficiles à réparer pour la cellule.

EN CHIFFRES

0,03 mGy

(1 mGy = 10^{-3} Gy)

Dose de rayons cosmiques absorbée au cours d'un vol de New York à Los Angeles

0,1 mGy

Dose absorbée pendant une radiographie de la poitrine

0,7 mGy

Dose absorbée pendant une mammographie

3-4 mGy

Exposition moyenne accumulée pendant une année due à toutes les sources naturelles (sol, rayons cosmiques, radon, etc.)

4 Gy

Dose pour laquelle on estime à 50 % les risques de décès

Ainsi, la partie du rayonnement spatial ayant un TLE élevé est bien plus dangereuse que les types de rayonnements ionisants classiques que l'on rencontre sur Terre. Les implications pour les voyages dans l'espace profond sont considérables, comme nous allons le voir.

REPRODUIRE LE RAYONNEMENT COSMIQUE SUR TERRE?

Il est difficile de produire sur Terre un rayonnement aux caractéristiques similaires à celles des rayons cosmiques, afin d'en étudier les effets sur l'organisme. Un des seuls endroits où il est possible de réaliser des expériences dans des conditions proches est le Laboratoire du rayonnement spatial, dans l'État de New York, une installation inaugurée en 2003, financée par la Nasa et gérée par le laboratoire national de Brookhaven, dont l'un des accélérateurs sert de source en ions énergétiques.

Avec mes collègues, nous avons étudié l'effet de ce rayonnement ionisant sur des souris. Les tests montrent de quelle façon des types particuliers de rayonnement cosmique, à diverses doses, affectent les tissus vivants. Récemment, nous avons exposé des souris à de faibles doses (0,05 à 0,30 Gy) de flux d'ions (oxygène et titane, par exemple). Nous avons ensuite évalué comment les radiations affectaient le comportement, la mémoire et les facultés de raisonnement des rongeurs. Pour ce faire, les souris effectuaient des tâches de type reconnaissance d'objets nouveaux (RON) et d'objets déplacés (OD). Dans un premier

temps, les animaux exploraient une boîte vide d'environ un mètre carré. Nous introduisions ensuite divers jouets dans la boîte et laissons les souris se familiariser avec eux. Plus tard (dans certains cas après quelques minutes seulement, et dans d'autres après plusieurs heures ou une journée entière), nous remplaçons ces jouets par de nouveaux objets (RON) ou nous les déplaçons dans la boîte (OD).

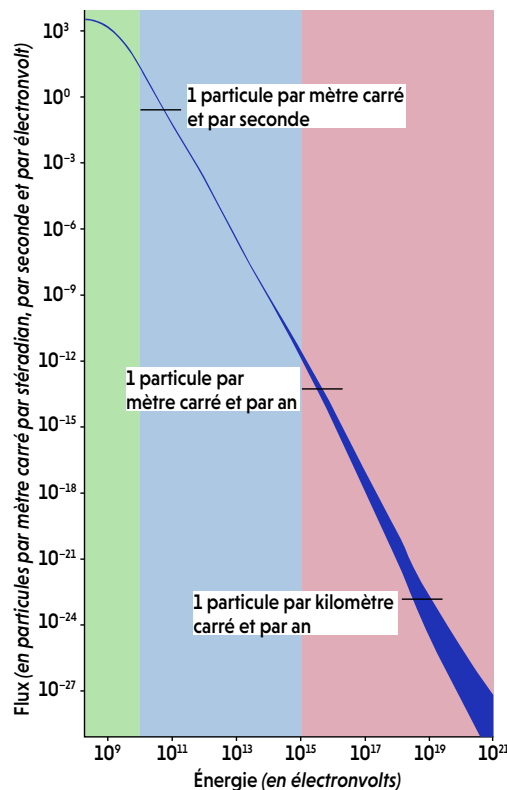
Un rongeur en bonne santé s'intéressera surtout à ce qui est nouveau dans son environnement. Il passera davantage de temps à explorer le nouveau jouet ou l'objet déplacé, plutôt que ceux qui n'ont pas changé. Une souris aux capacités diminuées passera moins de temps à fureter. Ces tests classiques sont des indicateurs fiables de différents types de fonctions de l'hippocampe (mémoire et apprentissage) et du cortex (raisonnement). Nous mesurons les performances d'un animal en comparant le temps passé sur le nouvel objet ou le nouvel emplacement et le temps total passé à explorer à la fois les situations nouvelles et les anciennes.

DES SOURIS MOINS CURIEUSES

Nos expériences avec les tâches RON et OD ont montré que l'irradiation diminue considérablement l'attrait d'une souris pour ce qui est nouveau. Six semaines après l'exposition au rayonnement, les performances des souris avaient chuté d'environ 90%, une variation qui était presque indépendante de la dose. De plus, des tests récents ont indiqué que ces effets perduraient encore 12, 24 et même 52 semaines après l'exposition. D'après ces résultats, l'exposition aux rayons cosmiques pourrait être problématique pour l'astronaute qui devra prendre des décisions ou résoudre des problèmes afin de mener à bien sa mission.

Mais que se passait-il dans le cerveau des souris irradiées? Mes collègues et moi avons étudié des coupes cérébrales de ces rongeurs et nous avons découvert que les ions énergétiques qui se propagent à travers le cerveau modifient le câblage neuronal. Pour voir spécifiquement le lien entre des dommages dans le cerveau et les modifications du comportement des souris, nous avons utilisé des souris qui avaient été génétiquement modifiées de telle sorte que leur cerveau présente des neurones fluorescents, visibles en microscopie à haute résolution. Nous avons recueilli une série d'images en fluorescence de diverses profondeurs dans des zones particulières du cerveau, que nous avons ensuite réunies et assemblées pour créer une représentation tridimensionnelle du cerveau.

Cette reconstruction a fait apparaître des modifications importantes dans les connexions des neurones. Le corps cellulaire d'un neurone comprend deux types d'extensions, l'axone qui transporte le signal du neurone jusqu'à une ➤



Le flux de rayons cosmiques qui arrivent au voisinage de la Terre dépend de l'énergie de ses particules. Les moins énergétiques sont les plus nombreuses. Elles proviennent principalement du Soleil (zone verte) avec des flux supérieurs à une particule par mètre carré et par seconde. Les rayons cosmiques d'énergie intermédiaire (zone bleue) ont une origine galactique avec des flux supérieurs à une particule par mètre carré et par an. Les particules les plus énergétiques (zone rouge) sont extrêmement rares, de l'ordre d'une par kilomètre carré et par an. Elles sont d'origine extragalactique mais les mécanismes qui leur confèrent de telles énergies ne sont pas encore connus.