

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).

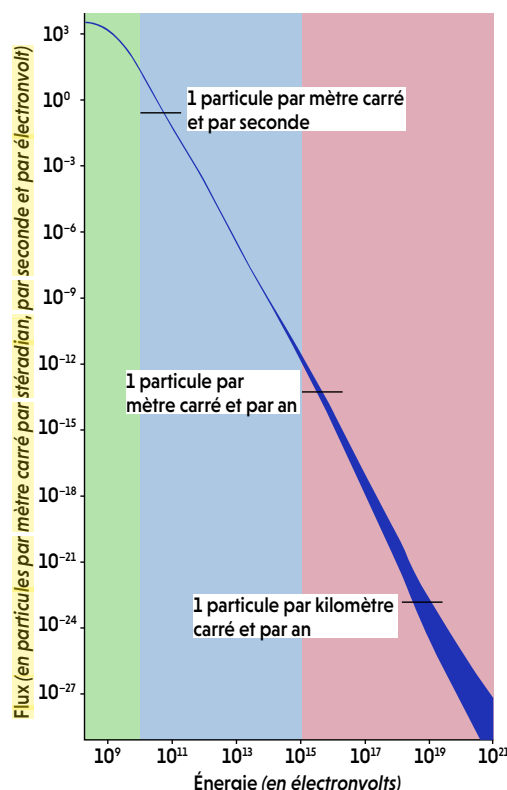
Un rongeur en bonne santé s'intéressera surtout à ce qui est nouveau dans son environnement. Il passera davantage de temps à explorer le nouveau jouet ou l'objet déplacé, plutôt que ceux qui n'ont pas changé. Une souris aux capacités diminuées passera moins de temps à fureter. Ces tests classiques sont 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.

synapse (la zone de contact entre deux neurones) et les dendrites qui conduisent les signaux de la synapse vers le neurone. Lors de précédentes études au sein de mon laboratoire, nous avons observé que des rayons X et gamma peu ionisants (à faible TLE) entraînaient une réduction importante de la longueur, de la surface et des ramifications des dendrites pendant 10, voire 30 jours après l'exposition au rayonnement. Nous avons utilisé le terme de «réduction de la complexité dendritique» pour qualifier l'ensemble de ces dommages. Plus récemment, en 2015, nous avons mis en évidence que de très faibles doses de particules chargées provoquent des pertes significatives et persistantes de complexité dendritique.

De plus, nous avons observé ces changements dans une région spécifique du cerveau, le cortex préfrontal médian, une zone connue pour intervenir dans la mémoire, et dont nous soupçonnions qu'elle pourrait être endommagée au vu de nos tests du comportement des rongeurs. Et ces résultats n'excluent pas que d'autres régions du cerveau ou d'autres circuits neuronaux puissent être endommagés.

ÉLAGAGE DE L'ARBRE NEURONAL

En améliorant encore la résolution de nos images, nous avons recherché des signes d'altération sur d'autres structures dans le cerveau telles que les épines dendritiques, des excroissances minuscules (moins d'un micromètre, soit une fraction de l'épaisseur d'un cheveu humain) de la dendrite qui jouent un rôle important dans les fonctions d'apprentissage et de mémorisation. Si les dendrites sont les branches d'un arbre, les épines dendritiques en sont les feuilles. Les épines dendritiques contiennent les mécanismes synaptiques qui permettent aux dendrites de recevoir des signaux neuronaux.

Nos expériences avec des rayons X et d'autres avec des ions ont révélé une sensibilité marquée des épines dendritiques à l'irradiation. Et nous avons trouvé que la densité d'épines dendritiques diminuait nettement après l'exposition d'une souris, avec des effets visibles sur des périodes courtes (10 jours) ou longues (6 semaines). Ces effets persistants attestent de la capacité des ions des rayons cosmiques à provoquer des changements structuraux importants en réduisant le nombre de connexions synaptiques dans le cerveau, changements qui compromettent la capacité des neurones à assurer leur rôle.

Et effectivement, avec un suivi individuel des performances des souris, nous avons montré que lorsque la densité dendritique diminuait, les capacités cognitives en faisaient de même. Les animaux dont les performances étaient les plus mauvaises (c'est-à-dire dont la curiosité et

l'exploration de la nouveauté étaient réduites) présentaient aussi la plus faible densité d'épines dendritiques. Cela suggérerait que la perturbation de la cognition était au moins en partie liée à la réduction du nombre d'épines dendritiques.

Tous ces résultats semblent ainsi confirmer ce que la Nasa soupçonnait depuis des années: les rayons cosmiques peuvent nuire aux performances cognitives des astronautes. Jusqu'à présent, ces craintes se fondaient en grande partie sur la littérature clinique documentant toute une gamme d'effets cognitifs chez des patients ayant survécu à une radiothérapie crânienne dans le cadre du traitement d'un cancer. Mais par le passé, les chercheurs hésitaient à

Le rêve de voyager dans le Système solaire et au-delà pourrait rester à jamais hors de portée

extrapoler ces résultats aux astronautes parce qu'il s'agit d'individus exposés à des doses et des types de rayonnement différents.

En clinique, une dose journalière typique (2 Gy) dépasse la plupart des estimations de la dose absorbée au cours d'une mission vers Mars (en comptant un an de voyage pour faire l'aller-retour et un an sur place). Les doses interplanétaires sont de l'ordre de 0,48 milligray par jour et la moitié seulement sur Mars (la masse de la planète bloque le rayonnement arrivant par en dessous). Par ailleurs, bien que les doses utilisées en clinique soient beaucoup plus élevées que dans l'espace, les rayons X et gamma utilisés pour traiter les tumeurs sont peu ionisants (TLE faible) alors que les particules chargées qui nous inquiètent dans l'espace ont un fort pouvoir ionisant (TLE élevé). Pour ces raisons, il est difficile d'extrapoler les conséquences pour les astronautes à partir des traitements de radiothérapie.

Cependant, pour être complet, quelques précautions sont à prendre dans l'interprétation de nos résultats. Nous avons utilisé des doses de rayonnement comparables à celles que recevraient des voyageurs spatiaux, mais nous n'avons pas pu administrer ces doses au même rythme que celui auquel les astronautes