

> 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 suggérait 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.

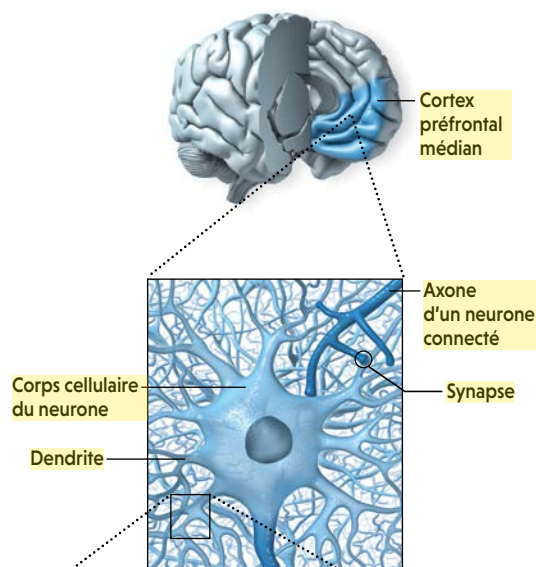
En clinique, une dose journalière typique (2 Gy) dépasse la plupart des estimations de la dose absorbée au cours d'une mission vers Mars (en comptant un an de voyage pour faire l'aller-retour et un an sur place). Les doses interplanétaires sont de l'ordre de 0,48 milligray par jour et la moitié seulement 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

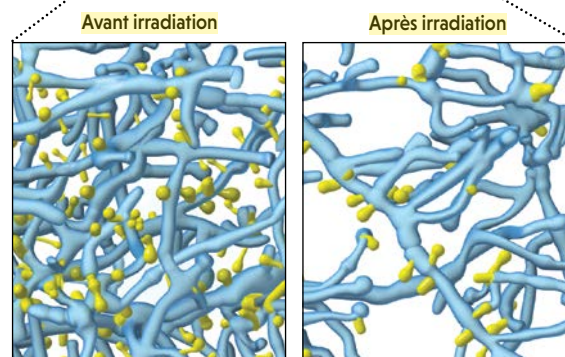
L'IMPACT DES RAYONS COSMIQUES SUR LE CERVEAU

Pour tenter d'évaluer les dommages causés par les rayons cosmiques au cerveau des astronautes, les chercheurs ont exposé des souris à un flux de particules chargées reproduisant au mieux celui qui se propage dans l'espace. Ils ont étudié à la fois la baisse des performances cognitives des rongeurs et les dommages physiques dans leur cerveau.

Le rayonnement simulant celui régnant dans l'espace endommage une région du cerveau des souris nommée cortex préfrontal médian, qui est associée à la mémoire. Dans cette région, le nombre et la taille de certaines excroissances des neurones ont diminué à la suite de l'irradiation.



Les dendrites reçoivent des signaux chimiques émis par d'autres neurones. Six semaines après l'exposition à une dose de rayonnement de 0,3 gray, les souris présentaient une réduction de 20 % à 40 % du nombre de leurs épines dendritiques (*en jaune*), petites excroissances de la branche principale de la dendrite qui jouent un rôle dans l'apprentissage et la mémorisation.



seraient soumis en conditions réelles. Dans l'espace, l'exposition des astronautes aux rayons cosmiques s'étale sur plusieurs mois ou plusieurs années. Parce que nous ne disposons que d'un accès limité à l'accélérateur, nous devons administrer la même dose en quelques minutes seulement.

Une question cruciale se pose donc: si la dose est administrée à un rythme plus lent, les cellules auraient-elles le temps de se réparer et de guérir? Il est peu probable que la différence de rythme d'exposition ait un effet marqué, parce que la dose totale est faible. En outre, les particules cosmiques les plus préoccupantes sont celles à TLE élevé, qui produisent des dommages cellulaires très localisés et dont il est difficile de se remettre, quelle que soit la rapidité d'administration. De plus, la plupart des régions du cerveau sont incapables de générer de nouveaux neurones facilement, ce qui entrave

encore davantage une éventuelle guérison. Et bien que nos découvertes concernent des rongeurs, et non les humains, nous n'avons aucune raison de penser qu'un neurone humain présenterait une réaction au rayonnement cosmique différente de celle des neurones de souris.

Pour envoyer des humains aux quatre coins du Système solaire, la liste des obstacles vient donc de s'allonger. Les astronautes auront besoin de fusées plus puissantes que celles disponibles aujourd'hui, et une fois arrivés à destination ils auront besoin d'habitats et de moyens pour exploiter les ressources sur place afin de produire de l'eau et des ergols. Nous devons maintenant, en plus, prendre en compte la nécessité de protéger les colons spatiaux des rayons cosmiques, et ce dernier point pourrait être l'obstacle le plus difficile à surmonter.

La première solution possible serait de construire des boucliers qui arrêteraient les ➤