



COSMOLOGIE

P.26
**LA CRISE COSMIQUE
DE LA CONSTANTE
DE HUBBLE**

Richard Panek

La vitesse d'expansion de l'Univers a fait l'objet de deux mesures aux résultats incompatibles. Une troisième vient de compliquer encore la situation. Chacune semble pourtant fiable. Où est l'erreur?

P.36
**CONSTANTE DE HUBBLE :
« LA DIVERSITÉ DES MÉTHODES
DE MESURE ENRICHT LE DÉBAT »**

Entretien avec Frédéric Courbin

Pour sortir de la crise provoquée par les mesures de la constante de Hubble, de nombreux chercheurs développent des méthodes de mesure indépendantes de celles utilisées jusqu'ici. Tour d'horizon.

Cahier partenaire

RÉSILIENCE ET DIVERSITÉ ÉNERGÉTIQUE
En partenariat avec

Au centre
du numéro



Pages
I à XXXII

RENDEZ-VOUS

P.72

LOGIQUE & CALCUL

**QUAND
LES MACHINES
FONT DES
MATHÉMATIQUES**

Jean-Paul Delahaye

Les intelligences artificielles seront-elles un jour capables de produire des théorèmes aussi intéressants que ceux des mathématiciens humains? On en est encore loin, mais les choses avancent peu à peu.



P.78

ART & SCIENCE

La mer...
qu'on voit monter
Loïc Mangin

P.80

IDÉES DE PHYSIQUE

Les petits bateaux
de Marangoni
*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*

P.84

**CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION**

Les félins,
rois de l'hybridation
Hervé Le Guyader

P.89

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des dérivés de l'ail
dans le lait maternel
Hervé This

P.90

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Agenda

P.22 Homo sapiens informaticus

P.24 Questions de confiance

NEUROSCIENCES

DU CONTRÔLE DE LA MÉMOIRE AU STRESS POST-TRAUMATIQUE

L'attaque terroriste du 13 novembre 2015 à Paris a été un choc pour la population et surtout pour les survivants, dont une partie souffrent de troubles de stress post-traumatique.



Les mécanismes du contrôle de la mémoire, et pas seulement la mémoire, seraient impliqués dans les troubles de stress post-traumatique.

Les attaques terroristes qui ont ciblé le Bataclan et plusieurs autres sites à Paris et à Saint-Denis le 13 novembre 2015 ont profondément marqué les survivants, leurs proches, et plus largement toute la société française. Pour comprendre comment un événement aussi tragique s'inscrit dans la mémoire collective et individuelle, l'Inserm, le CNRS et Hesam Université ont lancé le programme 13-Novembre sous la direction de l'historien Denis Peschanski et du neuropsychologue Francis Eustache. Dans le cadre de ce projet, Pierre Gagnepain,

chercheur à l'Inserm, au centre Cyceron, à Caen, et ses collègues se sont intéressés aux mécanismes cérébraux impliqués dans le stress post-traumatique. Pourquoi certaines personnes développent-elles des symptômes de stress post-traumatique alors que d'autres semblent faire preuve d'une meilleure résilience ?

Le stress post-traumatique se manifeste de diverses façons, avec des symptômes qui évoluent de façon progressive et restent parfois silencieux pendant des mois, voire des années. L'une des manifestations les plus caractéristiques est l'intrusion fréquente et non contrôlée de

«flashes» de souvenirs, sous la forme d'images ou d'odeurs associées au traumatisme vécu. Les victimes revivent ainsi en permanence l'épisode traumatique, ce qui engendre une grande détresse aussi bien émotionnelle que physique.

On associait jusqu'à présent ce trouble au dysfonctionnement de la mémoire: les souvenirs intrusifs persistent à la façon d'un disque rayé qui répète en boucle les mêmes notes. Des analyses par imagerie ont confirmé le rôle de la mémoire dans ce trouble, notamment de l'hippocampe, région du cerveau impliquée dans la formation de la mémoire. Dès lors, les approches thérapeutiques actuelles consistent à essayer de contextualiser ces souvenirs pour les ancrer dans le passé et d'en réduire l'impact; mais pour certains

patients, travailler directement sur ces souvenirs pouvait avoir un effet contre-productif et aggravant.

Pierre Gagnepain et ses collègues ont étudié une autre piste: ce ne serait pas le travail sur le souvenir qui, en soi, aggrave le stress, mais plutôt la défaillance du système cérébral de contrôle, dont l'un des rôles est d'inhiber les souvenirs stressants.

Les chercheurs ont notamment travaillé avec 102 volontaires parmi les personnes qui avaient subi les attentats, dont 55 présentent un trouble de stress post-traumatique. Les chercheurs ont créé des souvenirs intrusifs (neutres et sans lien avec les attentats) chez tous les participants et ils ont analysé leur capacité à supprimer ces souvenirs. Les personnes étaient d'abord exposées à des associations d'un mot et d'une image sans liens. Ainsi, quand elles lisaient un mot, elles pensaient de façon automatique à l'image associée. Ensuite, les chercheurs leur ont demandé d'essayer de ne plus penser à l'image quand elles voyaient les mots associés.

Chez les personnes ne souffrant pas de stress post-traumatique, l'imagerie IRM fonctionnelle a révélé une forte connexion entre le cortex préfrontal (région responsable de l'inhibition, notamment de la mémoire) et les structures associées à la mémoire (comme l'hippocampe) lors du contrôle des souvenirs intrusifs. Dans ce cas, le mécanisme de contrôle intervient sur l'activité de l'hippocampe et bloque l'activation des souvenirs intrusifs.

Chez les sujets souffrant de stress post-traumatique, ces connexions sont quasiment absentes et l'activité des régions de la mémoire n'est pas régulée. Il reste cependant à déterminer si ce dérèglement du contrôle de la mémoire est lié à un facteur préexistant ou s'il est une séquelle de l'épisode traumatique vécu.

En montrant l'implication du contrôle de la mémoire dans le stress post-traumatique, Pierre Gagnepain et ses collègues ouvrent une piste thérapeutique intéressante qui viserait à renforcer le mécanisme de contrôle de la mémoire sans avoir à toucher aux souvenirs stressants. ■

SEAN BAILLY

A. Mary et al., *Science*, vol. 367, eaay8477, 2020

Déchets nucléaires : l'épreuve de la corrosion

Une équipe américaine a testé en conditions réelles les stratégies de conditionnement de déchets radioactifs. Elle a constaté des effets de corrosion sur les colis vitrifiés. François Besnus, directeur de l'environnement à l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), met en perspective ce résultat.



Propos recueillis par Sean BAILLY

FRANÇOIS BESNUS
directeur de
l'environnement à l'IRSN

Quels types de déchets sont concernés par cette étude ?

Lorsque le combustible d'une centrale nucléaire est usé, il est retraité et dissous dans une solution chimique. On récupère l'uranium et le plutonium, qui sont recyclés et réutilisés. Le reste de la solution contient des produits de fission, hautement radioactifs, qui ne peuvent pas être revalorisés. Il est mélangé à de la silice dans un creuset pour former un verre. Les éléments radioactifs sont alors piégés dans la matrice vitreuse, et le tout est coulé dans une enveloppe en inox. La période radioactive de ces déchets est de l'ordre de la centaine de milliers d'années. À terme, en France, tous ces déchets seront stockés dans la Meuse, à 500 mètres sous la surface si l'installation Cigéo est autorisée.

Que savait-on du vieillissement des déchets vitrifiés jusqu'à présent ?

Les processus en jeu sont bien connus : l'acier de l'enveloppe va se corroder en présence d'eau. Un phénomène dit de « piqûration » se produit et conduit à des conditions localement très acides. Et les milieux très acides déstabilisent la matrice vitreuse, qui se dissout.

L'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) mène depuis longtemps un programme sur l'étude de la dissolution du verre dans un contexte de stockage. Ici, Gerald Frankel, de l'université d'État de l'Ohio, et ses collègues ont étudié l'influence locale de la corrosion de l'inox sur la dégradation du matériau vitrifié dans des conditions représentatives du projet de stockage américain Yucca Mountain. Les chercheurs ont observé des réactions complexes de corrosion et de dissolution du verre. Les processus étaient déjà connus, mais il était intéressant de voir le comportement à l'interface de ces

matériaux dans un environnement spécifique.

L'eau joue un rôle essentiel dans la dissolution, mais les sites de stockage ne sont-ils pas secs ?

Le site américain Yucca Mountain se trouve dans une région très aride. Mais Gerald Frankel et ses collègues ont considéré qu'on ne peut pas prévoir quelle sera la situation climatique de la région dans, par exemple, mille ans. Ils ont donc étudié ce qui se passe en présence d'eau, afin de voir l'incidence de ce phénomène sur la sûreté du stockage.

En France, la stratégie est très différente. On sait que le site prévu est saturé en eau. Les interactions avec l'eau ont déjà été prises en compte dans la démonstration de sûreté du stockage, même si elles n'ont pas été modélisées comme dans la nouvelle étude. Puisqu'il existe des incertitudes sur la vitesse de dissolution, plusieurs scénarios ont été considérés. C'est en connaissance de ces incertitudes que le milieu géologique étudié dans le laboratoire souterrain de Bure a été choisi. Les déchets seraient stockés dans une couche d'argile épaisse d'une centaine de mètres. Du fait de sa très faible perméabilité, la migration des éléments radioactifs libérés devrait être assez lente pour ne pas produire de pollution notable.

En matière de stockage de très longue durée de déchets radioactifs, il est impossible de tout savoir. Il faut essayer de comprendre au mieux les différents paramètres en jeu, comme le vieillissement des matériaux, la vitesse des réactions, etc., mais il existe toujours une part d'incertitude. Le principe de base est donc de gérer cette incertitude, d'être le plus prudent possible et de mettre en place des relais pour que, si un élément du système se révèle défaillant, un autre puisse garantir l'efficacité du stockage. Ce qui compte, c'est de mettre en place un système robuste par rapport à toutes les incertitudes présentes. ■

X. Guo et al., *Nature Materials*, vol. 19, pp. 310-316, 2020