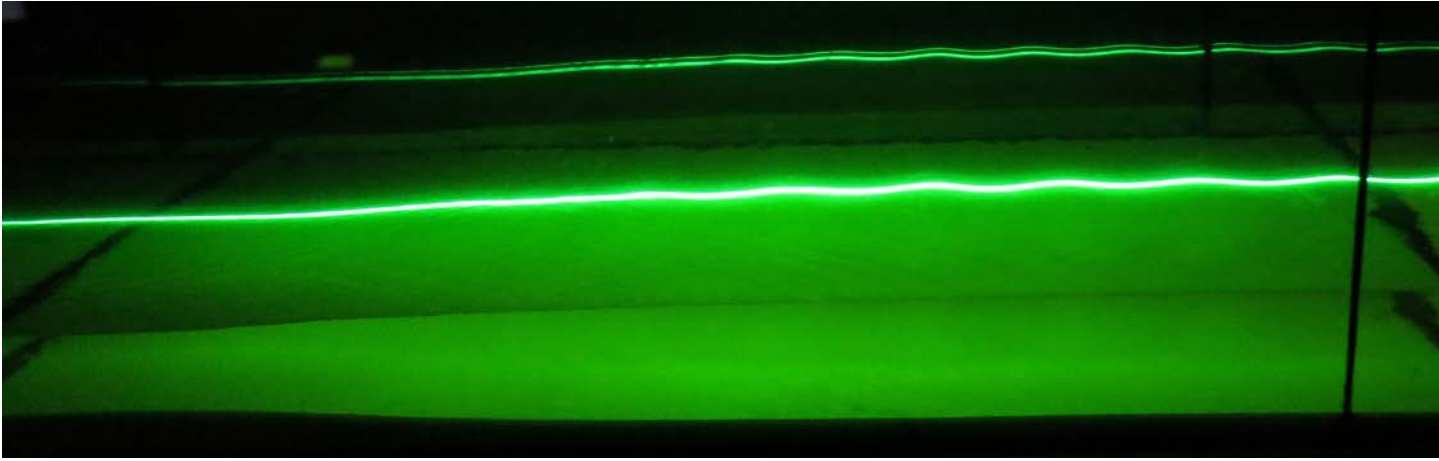




Physique

Le rayonnement des trous noirs simulé en laboratoire

Deux expériences portant sur des systèmes hydrodynamiques ont mis en évidence un phénomène analogue au faible rayonnement censé être émis par les trous noirs, prédit par Stephen Hawking.

Comment étudier en laboratoire des objets aussi extrêmes que les trous noirs ? Cela semble impossible. Ces astres sont si compacts qu'ils déforment l'espace-temps autour d'eux au point qu'aucun objet, même la lumière, ne peut s'en échapper. Pourtant des dispositifs analogues reproduisent certaines de leurs caractéristiques dont le « rayonnement de Hawking ».

En 1974, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement lorsqu'on prend en compte des fluctuations d'origine quantique qui existent dans le vide. D'après les calculs, ces fluctuations sont amplifiées au voisinage de l'horizon des événements (la frontière qui délimite la zone de non-retour autour du trou noir). Cette amplification se traduit par l'émission spontanée de paires de photons. Pour chaque paire, l'un des photons tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'en échappe. Du point de vue d'un observateur à bonne distance du trou noir, ce dernier émet donc un

rayonnement, le rayonnement de Hawking. Mais il est beaucoup trop faible pour envisager une détection, un trou noir de la masse du Soleil émettrait un rayonnement infime, à une température d'environ 60 nanokelvins.

En 1981, William Unruh, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, a montré qu'il existe une correspondance entre la propagation des ondes lumineuses au voisinage d'un trou noir et celles des ondes sonores dans un fluide dont la vitesse d'écoulement franchit celle du son. Des systèmes hydrodynamiques, nommés trous noirs acoustiques, reproduisent, par analogie, certaines des propriétés de leurs homologues stellaires. Plusieurs approches ont été explorées pour créer des écoulements analogues aux trous noirs dans des systèmes hydrodynamiques.

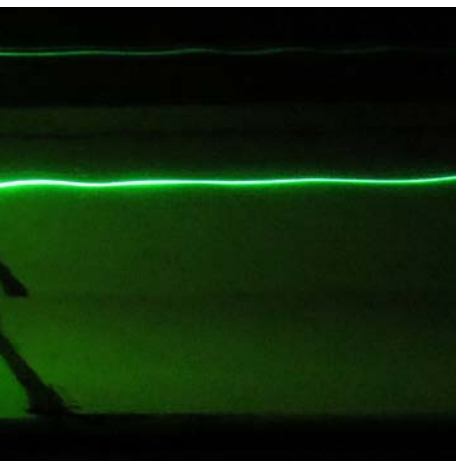
Jeff Steinhauer, du Technion, en Israël, et une équipe franco-britannique codirigée par Germain Rousseaux, de l'institut Pprime, à Poitiers, et par Renaud Parentani, du Laboratoire de physique

théorique de l'université Paris-Sud, ont utilisé deux dispositifs très différents pour observer l'équivalent du rayonnement de Hawking.

Jeff Steinhauer a refroidi un nuage d'atomes de rubidium à quelques nanokelvins pour obtenir un condensat de Bose-Einstein, un état de la matière possédant un comportement quantique collectif. Un laser a mis le condensat en mouvement de telle sorte qu'une partie de l'écoulement est subsonique et l'autre supersonique. La limite entre les deux régions est l'analogue de l'horizon des événements. En parfaite analogie avec la formation de paires de photons décrite par Hawking, des paires de quasi-particules, nommées phonons, sont émises de part et d'autre de cet horizon sonore. Un phonon est happé dans la région supersonique tandis que l'autre remonte à contre-courant la région subsonique. Jeff Steinhauer a montré que les propriétés des deux phonons sont corrélées, du moins dans une certaine gamme d'énergie, comme on s'y attend

dans le cas du rayonnement de Hawking.

L'équipe franco-britannique a utilisé un autre système analogue : un écoulement d'eau turbulent dans un canal de sept mètres de long. Dans ce cas, le courant joue le rôle de l'espace-temps et les fluctuations de la surface de l'eau celui des ondes lumineuses. Un obstacle, placé au fond du canal, accélère le flot pour bloquer les ondes qui remontent le courant. De ce point de vue, ce dispositif est l'analogue d'un trou blanc, l'hypothétique contraire d'un trou noir, c'est-à-dire une région de l'espace où rien ne peut pénétrer. Quel est alors l'analogue du rayonnement de Hawking ? Les ondes qui remontent le courant jusqu'à l'obstacle donnent naissance à deux ondes qui repartent vers l'aval. L'une d'entre elles, la principale, transporte l'essentiel de l'énergie de l'onde incidente. L'autre, en revanche, a une amplitude très faible et possède la propriété étonnante de transporter une énergie négative. Les



© Institut Prima

Le courant d'eau du canal avec un obstacle au fond (à gauche) constitue un système analogue à un trou noir. Les chercheurs ont montré que les ondes de surface présentent des caractéristiques analogues aux paires de Hawking.

chercheurs ont montré que ces deux ondes sont corrélées entre elles et constituent l'analogue des paires formées par l'effet Hawking.

Ces deux résultats sont une percée importante dans l'étude des systèmes analogues des trous noirs. Toutefois, précise Renaud Parentani, les prédictions théoriques ne sont pas encore en parfait accord avec les données observationnelles recueillies. Il convient donc de raffiner ces prédictions et de planifier de nouvelles expériences. Germain Rousseaux ajoute qu'une des prochaines étapes serait d'associer l'analogue d'un trou noir et celui d'un trou blanc. En astrophysique, ces deux objets sont reliés par un hypothétique trou de ver. Son analogue hydrodynamique, qui reste à explorer, pourrait jeter un nouvel éclairage sur ces mystérieuses solutions de la relativité générale.

Sean Bailly

J. Steinhauer, *Nature Physics*, vol. 12, n° 10, pp. 959-965, 2016
L.-P. Euvé et al., *PRL*, vol. 117, 121301, septembre 2016

Médecine

La pollution de l'air touche le cerveau

Des nanoparticules de magnétite, un oxyde de fer, issues de la pollution atmosphérique, dans les tissus cérébraux d'habitants de grandes villes : c'est ce qu'ont découvert Barbara Maher, de l'université de Lancaster, en Angleterre, et ses collègues. Ces nanoparticules influencent-elles sur la survenue ou l'aggravation de maladies neurodégénératives ? Pour Anna Bencsik, directrice de recherche à l'Anses, les travaux sur le sujet restent encore balbutiants.

Comment Barbara Maher et ses collègues ont-ils découvert l'origine de ces nanoparticules ?

Anna Bencsik : Les chercheurs ont analysé des échantillons de cerveaux de 37 personnes décédées, de tout âge, et résidant toutes dans des villes polluées : Mexico et Manchester. Ils ont montré que la forme, la taille et la composition des nanoparticules de magnétite ne correspondent pas à une origine endogène, c'est-à-dire issue de l'activité métabolique des cellules, mais à une source exogène. Ces nanoparticules sont produites lors d'activités humaines (combustion, trafic automobile, etc.).

En quoi cela est-il nouveau ?

A. B. : Cette étude apporte la preuve que des nanoparticules métalliques issues de l'air pollué arrivent jusqu'à notre cerveau, franchissant la barrière spécifique à cet organe, la barrière hématoencéphalique, pourtant considérée comme efficace vis-à-vis d'agents xénobiotiques. On peut cependant regretter que seule la région du cortex frontal ait été analysée ce qui ne nous renseigne guère sur les voies d'accès des nanoparticules. De plus, aucun cerveau de personnes vivant dans des zones moins polluées n'a été étudié.

Les auteurs évoquent un lien entre nanoparticules de magnétite et des maladies neurodégénératives. Que sait-on sur le sujet ?

A. B. : Cette étude porte sur la description fine de ces nanoparticules pour définir leur origine et pas sur leur impact sur la santé. De plus, elles ont été retrouvées dans le cerveau de personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer mais aussi chez des individus sans maladies neurologiques.



Anna Bencsik, directrice de recherche à l'Anses

Signalons que nous sommes depuis longtemps entourés de nanoparticules naturelles ou produites par les activités humaines. Et il est reconnu qu'elles sont potentiellement néfastes sous la forme d'aérosols, indépendamment de leur origine. En cas d'inhalation, et du fait de leur très petite taille, elles atteignent les alvéoles pulmonaires où elles provoquent des maladies respiratoires et cardiovasculaires. En revanche, la possibilité d'une atteinte cérébrale n'a été considérée que très récemment, même si on suspectait que

leur taille leur permet de pénétrer jusqu'au cerveau en franchissant la barrière hématoencéphalique.

Peut-on relier la présence de cette pollution nanoparticulaire à un risque accru de troubles neurodégénératifs ?

A. B. : Quelques rares études ont tenté d'étudier l'influence d'une pollution atmosphérique sur les troubles cérébraux mais la plupart présente un niveau élevé d'incertitude qui ne permet pas de conclure. En revanche, une étude récente menée aux États-Unis suggère un lien possible entre la concentration en nanoparticules dans l'air et le nombre d'admissions en hôpital pour démence. La pollution particulaire accélérerait l'aggravation des maladies neurodégénératives préexistantes, sans doute en participant à l'inflammation des tissus cérébraux. Malgré tout, le sujet reste peu exploré : l'article de Barbara Maher devrait participer à un éveil des consciences sur l'urgence à soutenir la recherche sur trois axes : l'épidémiologie des maladies neurodégénératives en lien avec la pollution nanoparticulaire, la mesure des effets chez l'homme et le développement de modèles expérimentaux d'exposition à la pollution plus réalistes.

Martin Tiano

B. A. Maher et al., *PNAS*, 2016

Nouveau chef à Saint-Dizier

Et de quatre ! Au cours des années 2000, trois tombes de membres de l'élite mérovingienne datant du VI^e siècle ont été découvertes dans une nécropole familiale à Saint-Dizier, en Haute-Marne. Les archéologues de l'Inrap viennent d'annoncer en avoir retrouvé une quatrième, un peu éloignée de celles des deux chefs guerriers et de la jeune femme déjà mis au jour. Ce dernier caveau abrite également un chef mérovingien mais, quelque temps après l'inhumation, son corps a été poussé sans ménagement sur le côté pour faire de la place à un haut personnage chrétien avant qu'une chapelle commémorative ne soit édiflée au-dessus de la sépulture. Le défunt chrétien descend-il du chef mérovingien ? Cette tombe réemployée est-elle le témoignage de la conversion d'une famille franque au catholicisme, entraînée par le baptême de Clovis ? Difficile à dire pour l'instant. Mais le tombeau de la jeune femme contenait une magnifique croix byzantine...

Géophysique

Un séisme lent aurait déclenché un tremblement de terre violent

Les tremblements de terre ne sont pas tous des secousses brèves et violentes, capables de détruire une ville ou de provoquer un raz-de-marée. Il existe des séismes beaucoup plus discrets qui libèrent pourtant tout autant d'énergie mais plus progressivement. Ces séismes « lents » se manifestent pendant quelques jours, voire plusieurs mois. Ils ont été découverts il y a seulement une vingtaine d'années parce que leurs conséquences sont peu visibles.

De nombreuses questions se posent encore sur ces séismes, en particulier déclenchent-ils parfois des tremblements de terre brefs et violents ? Cette hypothèse a été avancée pour le séisme de Tohoku, au Japon, en 2011. Mais ce scénario reste discuté parmi les spécialistes. Mathilde Radiguet et ses collègues de l'université de Grenoble-Alpes, en collaboration avec des chercheurs de l'université de Mexico, apportent un nouvel indice en faveur de ce

lien entre certains séismes lents et les séismes violents.

Les chercheurs ont travaillé sur des zones de subduction, où les plaques tectoniques subissent des déformations mécaniques et accumulent de l'énergie. Lorsque celle-ci est libérée subitement, elle produit un séisme brutal. Mais parfois cette énergie est dissipée progressivement par des séismes lents : les plaques glissent l'une contre l'autre et émettent des vibrations de faible amplitude.

Grâce à un réseau de 39 stations GPS, Mathilde Radiguet et ses collègues ont montré que des séismes lents étaient à l'œuvre dans la région de Guerrero, au Mexique, où se rencontrent la plaque continentale américaine et la plaque océanique des îles Cocos dans l'océan Pacifique. Ces séismes lents expliqueraient pourquoi il n'y a pas eu de secousse violente entre 1912 et 2014 dans cette zone.

Or un séisme lent était en cours depuis deux mois quand le



Station GPS placée au cœur de la lacune sismique de Guerrero.

tremblement de terre de magnitude 7,3 s'est déclenché à Papanoa, au nord-ouest de la région le 18 avril 2014. Le premier a-t-il déclenché le second ? Les chercheurs suggèrent que le séisme lent a pu fragiliser la zone de l'hypocentre du séisme ou y accumuler de l'énergie mécanique.

S. B.

M. Radiguet et al., *Nature Geoscience*, en ligne, 3 octobre 2016

Biologie animale

Comment les fourmis retrouvent leur chemin

Le sens de l'orientation des fourmis du désert du genre *Cataglyphis* n'est plus à démontrer. Dans un environnement visuellement peu varié, elles s'éloignent jusqu'à 200 mètres de leur fourmilière et retrouvent toujours leur chemin. Pour cela, elles estiment la distance parcourue en comptant le nombre de pas, ainsi que la direction du nid grâce à la polarisation de la lumière ; un système de navigation appelé intégration du trajet. Mais Matthias Wittlinger et Sarah Pfeffer de l'Institut de neurobiologie de l'université d'Ulm, en Allemagne, ont montré que les fourmis du désert

peuvent aussi compter sur un autre système de navigation indépendant du premier.

Les fourmis du genre *Cataglyphis* ont un comportement particulier : lorsqu'elles se déplacent d'un nid à un autre, les ouvrières sont portées par des récolteuses. Durant le trajet, la fourmi portée ne peut pas compter ses pas. Et pourtant, lorsque la paire est séparée, la fourmi transportée retrouve son point de départ. Par quel mécanisme ?

Pour le savoir, M. Wittlinger et S. Pfeffer ont bandé les yeux de la fourmi portée puis ont séparé la paire porteuse-portée après 10 mètres parcourus dans un

tunnel. La fourmi aveugle ne parvient plus à retourner jusqu'à la fourmilière, ce qui prouve qu'elle se sert d'éléments visuels pour se repérer.

Les chercheurs ont ensuite bandé les yeux de la fourmi portée juste avant la séparation. Alors qu'elle avait pu observer l'environnement à l'aller, elle doit s'en remettre à son système d'intégration du trajet pour rentrer au nid. Hélas : elle est complètement perdue. Les deux systèmes de navigation sont donc indépendants.

Alice Maestracci

S. Pfeffer et al., *Science*, vol. 353, n° 6304, pp. 1155-1157, 2016



© Matthias Wittlinger

Une fourmi du genre *Cataglyphis* dont les yeux ont été bandés.