

POUR LA SCIENCE

Décembre 2014 - n° 446

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le trou noir à l'origine du Big Bang

Notre Univers est-il né d'une
étoile à quatre dimensions ?

M 02687 - 446 - F: 6,20 € - RD



Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho • L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle

Rédacteur : Sébastien Bohler

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman,

Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Silvana Condemi, Matthieu Laneuville, Uwe Meierhenrich,

Renaud Parentani, Christophe Pichon, Romain Pigeaud, Alain

Riazuelo, Étienne Save

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.guillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré et Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04

Abonnement en ligne : <http://www.pourlascience.fr>

Courriel : abonnements@pourlascience.fr

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-Oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guteri. Design director : Michael Mrak. Editors :

Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher,

Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.

President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou

les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans

la revue « Scientific American », dans les livres édités par

« Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la

Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de tra-

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial

« Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à

« Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est inter-

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co-

pie [20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Monter en dimension

Big Bang... Cette expression, forgée avec dérision par l'astronome britannique Fred Hoyle (1915-2001), a fait florès, tout comme le modèle qu'elle désigne. Selon cette théorie, notre Univers – espace et temps compris – est issu de l'expansion, depuis quelque 14 milliards d'années, d'un état extrêmement dense et chaud. Avec son lot d'améliorations et d'ajouts, la théorie du Big Bang forme ce qu'il est convenu de nommer le modèle standard de la cosmologie.

Malgré les indéniables succès de ce modèle, plusieurs questions restent en suspens. En particulier celle de l'origine même du Big Bang. Quelle est la raison d'être de cet événement ? Y a-t-il un « avant-Big Bang » ? De telles questions, pourrait-on penser, relèvent de la métaphysique et non de la science. Mais l'ambition des théoriciens est telle, que certains s'en sont emparés et ont imaginé divers scénarios. L'un des plus originaux, récemment publié, est présenté ici par ses auteurs (voir pages 24-31).

Le Big Bang, une projection holographique d'un cataclysme quadridimensionnel ?

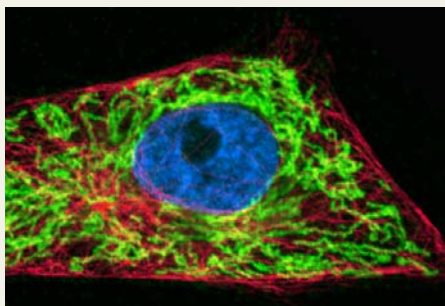
Ce modèle invoque l'objet le plus intrigant de l'astrophysique : un trou noir, astre si massif et compact que son champ de gravitation empêche même la lumière de s'en échapper. Sauf qu'ici, il ne s'agit pas d'un trou noir classique, mais d'un trou noir né de l'effondrement d'une étoile dans un univers où l'espace aurait quatre dimensions, et non trois. Par une sorte de projection dite holographique, le Big Bang et notre Univers tridimensionnel seraient le résultat de ce cataclysme quadridimensionnel.

L'idée d'un espace-temps ayant davantage de dimensions que celles accessibles à nos sens est récurrente dans l'histoire de la physique et de la cosmologie depuis les années 1920. On a tenté de l'exploiter dans des contextes divers ; sans véritable succès jusqu'ici. Mais elle revient si souvent que l'on ne s'étonnera pas outre mesure si le verdict des expériences et des observations lui devient favorable un jour, sous une forme ou une autre ! ■

1 Édito

Actualités

- 4 Un rayonnement de Hawking en laboratoire
- 5 L'anomalie du Karakorum en partie expliquée
- 7 Voir sous la peau
- 8 Les prix Nobel 2014



- 10 Des bactéries qui modulent l'appétit

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 12 **Point de vue**
Quelle transition énergétique pour la France ?
Patrick Criqui
- 14 **Entretien**
Publication scientifique : vers l'accès ouvert institutionnel ?
Denis Jerome
- 18 **Lu sur SciLogs.fr**
Le goût de l'intelligence
Richard Taillet
- 21 **Homo sapiens informaticus**
Homo habilis hypercapitalisticus
Gilles Dowek
- 22 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Une question de taille
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage ainsi qu'une offre de parrainage spéciale Noël posée sur toute la diffusion abonnée.
En couverture : © Mark Garlick/Science Photo Library/Corbis

À LA UNE

24 COSMOLOGIE Le trou noir à l'origine du Big Bang

Niayesh Afshordi,
Robert Mann
et Razieh Pourhasan

Le Big Bang et l'Univers qui en est issu pourraient être la conséquence de la formation d'un trou noir dans un espace à quatre dimensions. Ce scénario résoudrait certaines difficultés de la cosmologie.



32 MATHÉMATIQUES Martin Gardner, le jeu se poursuit

Colm Mulcahy et Dana Richards

Avec la rubrique mensuelle qu'il a tenue pendant près de 25 ans dans le magazine *Scientific American*, Martin Gardner a marqué le monde des mathématiques récréatives et a inspiré de nombreuses personnes.

38 ÉTHOLOGIE Une intelligence d'éléphant

Anna Smet, Catherine Hobaiter et Richard Byrne

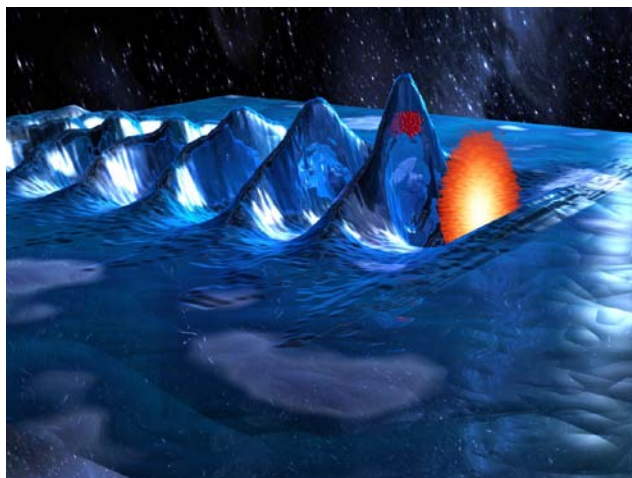
Probablement en raison de leur organisation sociale complexe, les éléphants ont développé d'étonnantes capacités de mémorisation, de coopération, de compréhension des autres et de communication.



46 **PHYSIQUE** Produire des rayons X et γ sur une table

Kim Ta Phuoc, Cédric Thauray et Sébastien Corde

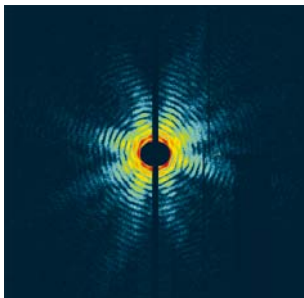
Grâce à des ondes de sillage créées par des impulsions laser ultrabrèves qui traversent un gaz, les chercheurs mettent au point des sources compactes et puissantes de rayons X ou gamma.



54 **PHYSIQUE** Le plus puissant faisceau de rayons X

Nora Berrah et Philip Bucksbaum

Le grand accélérateur linéaire de l'Université Stanford a été converti en laser à électrons libres. Il a ainsi donné naissance à la plus intense source de rayons X du monde.



62 **TECHNOLOGIE** Décupler nos sens

Gershon Dublon et Joseph Paradiso

Aujourd'hui, nous vivons déjà dans un monde truffé de capteurs. Demain, de nouveaux dispositifs matériels et logiciels nous connecteront à ce déluge de données. Pour une perception augmentée ?

Rendez-vous

70 **Histoire des sciences**

**Madame Picardet,
traductrice scientifique
ou cosmétique des Lumières ?**

Patrice Bret

Au XVIII^e siècle à Dijon, une femme acquit une réputation internationale en traduisant des écrits de chimistes et minéralogistes européens.

76 **Logique & calcul**

Une seule intelligence ?

Jean-Paul Delahaye

Fabriquer de l'intelligence est un défi que l'informatique veut relever. Quand elle réussit, c'est toujours de manière limitée et en évitant d'aborder de front l'intelligence humaine.

82 **Science & fiction**

Les cyborgs sont parmi nous !

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 **Art & science**

Mondrian et les arbres

Loïc Mangin

86 **Idées de physique**

Batailles de toupies

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 **Question aux experts**

**Peut-on échapper
à la pollution en ville ?**

Isabelle Coll

91 **Science & gastronomie**

Aubergines en osmose

Hervé This

92 **À lire**

96 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

Aussi en numérique !

**POUR LA
SCIENCE.fr**

Archives
depuis 1996



Application
Smartphone et Tablette



Suivez-nous sur les réseaux sociaux

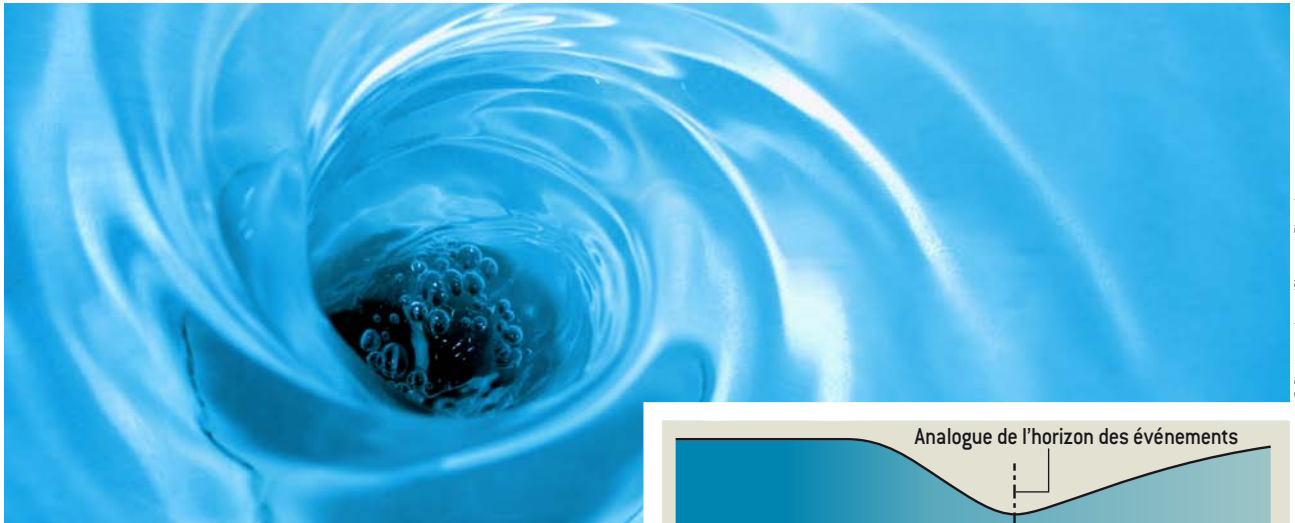


Actualités

Physique

Un rayonnement de Hawking en laboratoire

Il est possible de créer dans un fluide des « trous noirs acoustiques ». Ils émettraient eux aussi un analogue du rayonnement de Hawking, ce faible flux de particules qui émane des trous noirs.



© Shutterstock.com/Shvagert Ekaterina

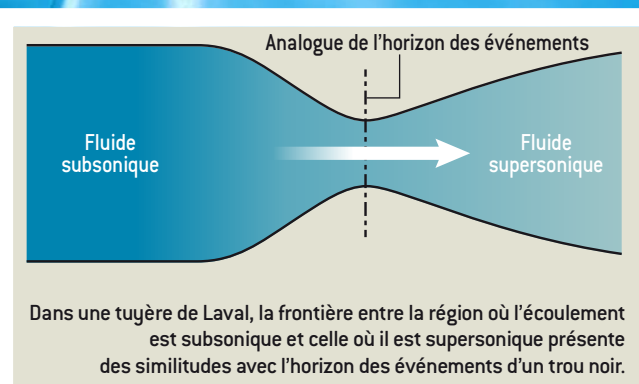
En 1974, Stephen Hawking a montré qu'un trou noir, astre si compact que même la lumière ne peut s'en échapper, n'est pas totalement noir : il émet un rayonnement ténu. Il paraît impossible d'observer le rayonnement de Hawking, trop faible pour être distingué du rayonnement du fond diffus cosmologique, vestige du Big Bang. Cependant, pour étudier les trous noirs, les physiciens ont développé une approche alternative qui repose sur les similitudes entre les équations qui décrivent les trous noirs et celles qui gouvernent les ondes acoustiques dans un fluide. Jeff Steinhauer, du Technion en Israël, a étudié un fluide d'atomes ultrafroids dans des conditions particulières, et a mis en évidence l'équivalent du rayonnement de Hawking dans ce système.

Un trou noir présente une frontière, nommée horizon des événements. Un objet qui le franchit en tombant vers le centre du

trou noir ne peut plus s'échapper, car la vitesse requise pour se libérer du champ gravitationnel est supérieure à celle de la lumière.

S. Hawking s'était intéressé à ce qui se passe à l'échelle microscopique à proximité de l'horizon. D'après la mécanique quantique, des paires particule-antiparticule naissent spontanément dans le vide et s'annihilent très vite sans laisser de trace. Mais S. Hawking avait montré qu'à proximité de l'horizon, la paire peut être séparée : l'une des particules tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe. Pour un observateur éloigné, le trou noir semble émettre des particules et perd donc de la masse : il « s'évapore ».

Pour un trou noir de masse stellaire, cette évaporation est lente et le rayonnement est trop faible pour être détecté. Et il n'est évidemment pas possible de créer un trou noir en laboratoire. Mais les physiciens ont trouvé une alternative intéressante : les trous



noirs acoustiques. La propagation du son dans un fluide présente parfois des points communs avec celle de la lumière près d'un trou noir. Considérons par exemple une tuyère de fusée, un cylindre dont le diamètre diminue puis augmente à la sortie (une tuyère de Laval, voir la figure). Dans le resserrement se produit un effet Venturi : le fluide accélère et atteint des vitesses supersoniques dans la partie évasée – les molécules se déplacent plus vite que des ondes acoustiques dans le milieu. Ainsi, si on émet des ondes acoustiques à contre-courant dans la partie où le fluide est supersonique, elles sont emportées par le courant et ne peuvent jamais remonter la tuyère jusqu'au bout.

C'est l'équivalent acoustique d'un horizon des événements.

L'analogie se retrouve jusque dans les équations qui décrivent la lumière autour d'un trou noir et les ondes acoustiques dans le fluide. Les physiciens ont alors supposé que les trous noirs acoustiques émettent aussi un rayonnement de Hawking, c'est-à-dire des ondes acoustiques, près de l'horizon. Cependant, les expériences réalisées jusqu'ici n'avaient pas réussi à mettre en évidence ce rayonnement.

J. Steinhauer a trouvé une solution pour amplifier le signal. Il a refroidi un ensemble d'atomes de rubidium à quelques nanokelvins pour former un condensat de Bose-Einstein, un fluide ayant un

Climatologie

L'anomalie du Karakorum en partie expliquée

Si la plupart des glaciers de l'Himalaya ont perdu de leur masse, le massif du Karakorum fait exception. Sarah Kapnick, de l'Université Princeton, et ses collègues ont identifié les raisons de cette anomalie. Étienne Berthier, glaciologue au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales, nous explique ces résultats récents.

comportement quantique collectif. Lorsque ce condensat est traversé par un faisceau laser, les atomes touchés atteignent une vitesse supersonique.

Comme dans les dispositifs précédents, les ondes acoustiques émises depuis l'horizon sont, en principe, trop faibles pour être mesurées. Cependant, le système a en réalité deux horizons, ce qui est aussi le cas pour les trous noirs en rotation, dits de Kerr. Le laser crée un puits de potentiel dans le condensat, où les atomes sont accélérés. Les ondes acoustiques formées dans ce puits sont piégées entre les deux bords du puits, qui jouent le rôle d'horizons. Elles sont réfléchies d'un bord à l'autre et sont ainsi amplifiées, un peu comme les photons qui font des va-et-vient entre les miroirs d'un laser (ce qui amplifie son rayonnement). Certaines ondes parviennent cependant à s'échapper au niveau d'un des horizons, de façon analogue à ce qui se passe avec une paire particule-antiparticule dans un trou noir stellaire. Le rayonnement de Hawking devient alors mesurable.

Il n'est pas encore possible de vérifier que ces ondes présentent toutes les caractéristiques du rayonnement de Hawking prévues par la théorie, mais la piste est prometteuse. Ce genre de dispositif permettrait même d'étudier des analogues acoustiques de l'intrication quantique, situation où deux particules forment un système aux propriétés indissociables même lorsqu'elles sont très éloignées (comme une paire particule-antiparticule dont l'une des composantes s'éloigne du trou noir tandis que l'autre reste piégée).

Sean Bailly

Nature Physics, en ligne le 12 octobre 2014

Pourquoi parle-t-on d'« anomalie du Karakorum » ?

Étienne Berthier : Le massif du Karakorum est situé à la frontière entre le Pakistan, l'Inde et la Chine. Il recèle de nombreux glaciers couvrant une surface de 20 000 kilomètres carrés. Diverses observations réalisées sur le terrain ou par satellites ont montré que cet ensemble de glaciers est stable ou a gagné légèrement en masse ces dernières années, contrairement aux autres glaciers de la chaîne himalayenne, d'où l'« anomalie ».

Pourquoi la mise en évidence de cette anomalie a-t-elle défrayé la chronique en 2012 ?

É. B. : L'existence d'une région du globe où les glaciers ne perdent pas de la masse a beaucoup fait couler d'encre et les climato-sceptiques ont rapidement instrumentalisé cette observation pour nier l'existence d'un réchauffement planétaire. Évidemment, une observation locale ne vient pas en contradiction avec un phénomène global, mais il était urgent que les climatologues s'emparent de cette question et apportent des éléments d'explication sur les glaciers du Karakorum.

Les spécialistes avaient-ils des pistes pour expliquer l'évolution du Karakorum ?

É. B. : Il y avait plusieurs pistes. Par exemple, le comportement saisonnier des précipitations diffère dans



le Karakorum et dans les autres régions himalayennes. Par ailleurs, la haute altitude moyenne des glaciers du Karakorum peut aussi jouer un rôle. En effet, cette région



É. Berthier est chargé de recherche au LEGOS, CNRS.

est très accidentée, avec quatre sommets à plus de 8 000 mètres, dont le K2, et de nombreux pics à plus de 7 000 mètres. On a aussi évoqué un accroissement possible des précipitations depuis 1979.

Que montrent les récentes simulations ?

É. B. : S. Kapnick et ses collaborateurs ont comparé trois régions himalayennes (Karakorum, l'Himalaya central et l'Himalaya oriental). Ils ont montré que les conditions météorologiques diffèrent entre ces régions. Bien que les altitudes soient comparables,

la position du Karakorum au Nord-Ouest des montagnes himalayennes fait que la température hivernale y est nettement plus basse que dans les autres régions. Cela explique que les précipitations, surtout hivernales, restent sous forme de neige même si la température augmente. Dans les autres massifs, l'essentiel de l'accumulation de neige se produit en été, au moment de la mousson. La température y est alors proche de 0 °C ; il y a donc une grande sensibilité au réchauffement climatique : la pluie remplace la neige et les glaciers perdent de la masse.

Ces simulations suffisent-elles pour expliquer l'anomalie ?

É. B. : C'est un premier pas, l'une des avancées étant l'utilisation d'un modèle régional de climat qui, avec sa maille de 50 kilomètres, permet de rendre compte des grands traits de la topographie, chahutée dans cette région. La prochaine étape consistera à l'associer avec un modèle de glacier pour obtenir un bilan quantitatif d'évolution des régions glaciaires.

S. B.

S. Kapnick et al., Nature Geoscience, en ligne, 12 octobre 2014

Deux familles d'exocomètes

Flavien Kiefer, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et ses collègues ont détecté 493 comètes autour de l'étoile Bêta Pictoris. Ces comètes se répartissent en deux familles aux caractéristiques différentes. Les premières sont proches de l'astre ; les secondes sont éloignées et résulteraient de la fragmentation d'un objet plus massif. D'après les observations, elles seraient soit plus jeunes, soit plus grosses que les comètes de la première famille. Ce résultat nous donne une image de ce qu'a pu être le Système solaire lorsqu'il n'était âgé que de quelques centaines de millions d'années.

Des océans plus acides

L'acidité des océans a augmenté de 26 % depuis le début de l'ère préindustrielle à cause du CO_2 atmosphérique. Cette augmentation pourrait atteindre 170 % d'ici 2100 si rien n'est fait, selon un rapport publié début octobre par le secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. L'acidification menace certains écosystèmes vulnérables et les activités humaines liées à la mer, telle l'aquaculture. De nombreuses études en cours cherchent à préciser les impacts écologiques et économiques du phénomène.

Détecter plus tôt un cancer

La détection précoce d'un cancer est l'une des clefs d'un traitement efficace. L'équipe de Paul Hofman, de l'Université de Nice, a réussi à déceler des cancers du poumon avant même que les tumeurs ne soient visibles par l'imagerie. Dès le début de la formation d'une tumeur invasive, des cellules cancéreuses en faibles nombres circulent dans le sang. Les chercheurs ont cherché à les détecter grâce à un test sanguin conçu avec la société Rarecells Diagnostics. Ils ont ainsi prédit l'apparition de tumeurs chez cinq patients, qu'ils ont pu opérer très tôt et qui n'ont eu depuis aucune récurrence.

Chimie

Pourquoi l'ADN tourne-t-il toujours à droite ?



© Shutterstock.com/vstudio

Certaines molécules sont dites chirales : comme les mains, elles existent en deux versions non superposables, l'une étant le miroir de l'autre. Mais certaines molécules n'existent que sous une seule des deux formes alors que l'autre serait tout aussi possible. C'est le cas notamment de la molécule d'ADN, qui ne se forme naturellement que selon une structure hélicoïdale droite. Pourquoi la molécule d'ADN qui tournerait vers la gauche n'existe-t-elle pas ?

Joan Dreiling et Timothy Gay, de l'Université du Nebraska, ont identifié un processus qui crée une asymétrie dans certaines dissociations électroniques de molécules chimiques. C'est un pas vers la compréhension de l'asymétrie du vivant.

Les chercheurs ont bombardé un gaz de bromocamphre, soit gauche soit droit, avec des électrons de très basse énergie. Ils ont montré que le mécanisme de dissociation électronique crée une asymétrie d'environ 0,03 %. Il reste à tester ce processus avec des molécules du vivant.

Un autre mécanisme, lié à la lumière polarisée éclairant la surface de comètes, peut aussi détruire préférentiellement des molécules gauches ou droites. L'atterrisseur *Philae* de la sonde *Rosetta* est d'ailleurs équipé pour analyser les molécules organiques dans la glace de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, ce qui permettra de tester ce scénario.

S. B.

Phys. Rev. Lett., vol. 113, 118103, 2014

Insolite

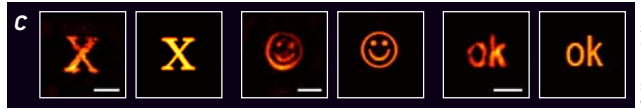
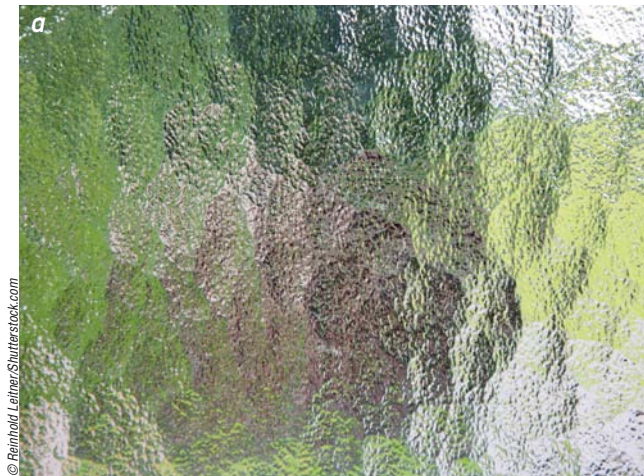
Des robots chez les manchots

Comment étudier les manchots sans leur imposer notre présence, susceptible de les stresser et de fausser les résultats ? Yvon le Maho, de l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien, et ses collègues ont élaboré un lecteur RFID monté sur un petit rover et déguisé en poussin. Les manchots étaient bien moins perturbés que par un humain et laissaient le rover s'approcher assez pour qu'il puisse lire leur puce d'identification, préalablement greffée.



© Frédérique Olivier/John Downer Productions

Physique



© Reinhold Leitner/Shutterstock.com

O. Katz et al., Nature Photonics, 2014

Voir sous la peau

Des physiciens ont élaboré une technique simple et rapide pour voir à travers un milieu diffusant, tel qu'une vitre dépolie ou un tissu biologique. Des applications en imagerie médicale sont envisagées.

Essayez de voir à travers le verre dépoli d'une fenêtre de salle de bain, la vitre teintée d'une voiture ou... la peau. Impossible ? L'équipe de Sylvain Gigan, du Laboratoire Kastler-Brossel (UPMC, ENS, CNRS, Collège de France) à Paris, en collaboration avec l'Institut Langevin (ESPCI ParisTech, CNRS, UPMC, P7, Inserm), a pourtant élaboré une technique qui rend cette prouesse possible.

Les tissus biologiques et plus généralement les milieux diffusants dévient la lumière dans toutes les directions, si bien que des objets placés derrière n'apparaissent que comme des taches floues. De nombreux travaux visent à reconstituer l'image des objets vus à travers ces milieux. En 2008, l'équipe de Changhuey Yang, à l'Institut californien de technologie, a par exemple reconstitué l'image de motifs imprimés vus à travers une mince couche de... blanc de poulet ! Les chercheurs se sont fondés sur des techniques dites de renversement temporel, où l'on renvoie la lumière en sens inverse (elle repasse à travers le milieu diffusant) pour reconstituer l'image de l'objet. Cependant, ces

techniques nécessitent des dispositifs complexes et, en outre, l'image est reconstruite du même côté que l'objet que l'on cherche à observer...

L'équipe de S. Gigan a exploité un autre principe : une tache de diffusion n'est pas organisée de façon aléatoire, et sa structure contient des informations sur celle de l'objet. En superposant la tache avec une version décalée d'elle-même, on construit une figure dite d'autocorrélation, à partir de laquelle on peut mettre en évidence les régularités de la structure et reconstruire l'image de l'objet.

L'idée n'est pas nouvelle. Dès les années 1970, l'astronome français Antoine Labeyrie l'avait utilisée pour détecter certaines étoiles binaires qui, autrement, ne sont visibles que sous forme de taches diffuses par les télescopes terrestres à cause de l'atmosphère. En 2012, Jacopo Bertolotti, de l'Université d'Exeter au Royaume-Uni, et ses collègues s'en sont inspirés pour reconstruire l'image d'un objet placé derrière un écran diffusant, mais ils devaient pour cela éclairer l'objet avec un laser sous de multiples angles et analyser les corrélations entre l'intensité lumi-

neuse des taches correspondantes. Le processus, lent et fastidieux, prenait plusieurs heures, voire plusieurs jours.

Ori Katz, de l'équipe de S. Gigan, et ses collègues ont réussi à reconstruire l'image d'un objet à partir d'une seule image de la tache de diffusion, prise avec un simple téléphone portable ! Pour ce faire, ils ont étudié la luminosité enregistrée par les différents pixels : chacun recevant la lumière sous un angle différent, il est possible d'obtenir la même information que par la méthode de J. Bertolotti avec une seule photographie.

La rapidité de cette technique ouvre la voie à des applications en imagerie médicale, car elle permet de voir à travers un milieu mouvant. On pourrait ainsi visualiser des tissus biologiques ayant préalablement reçu un marquage fluorescent ou qui réfléchissent la lumière et sont éclairés de l'extérieur. La profondeur observable atteindrait plusieurs millimètres, pour une résolution micrométrique (de l'ordre de la taille d'une cellule).

Guillaume Jacquemont

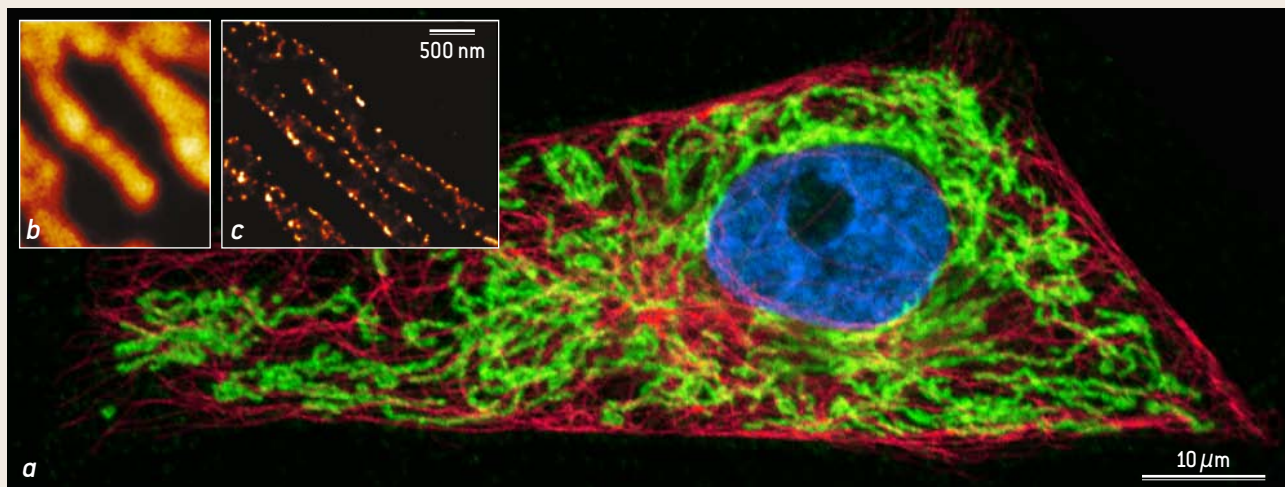
O. Katz et al., Nature Photonics, vol. 8, pp. 794-790, octobre 2014

La technique développée permettrait de reconstruire l'image de l'objet qui se cache derrière une vitre diffusante (a). Une photographie de la tache de diffusion prise par un téléphone portable contiendrait assez d'informations pour cela (b, photographie d'un motif en X lumineux vu à travers un milieu diffusant). La figure c montre trois exemples de motifs originaux (image de droite) et reconstruits (image de gauche) après le passage de leur lumière par un milieu diffusant. Les barres d'échelle correspondent à 1,7 millimètre.

Chimie

L'ère de la nanoscopie optique

Eric Betzig, Stefan Hell et William Moerner ont été récompensés pour le développement de deux techniques de microscopie à fluorescence permettant de visualiser le vivant à l'échelle nanoscopique.



Avec l'autorisation de Schmidt et al. *Nano Letters*, vol. 9, pp. 2508-2510 ©2009 American Chemical Society

Les mitochondries (*a*, en vert), les usines à énergie de la cellule, observées en microscopie STED avec le squelette de microtubules de la cellule (*en rouge*) et son noyau (*en bleu*). Les mitochondries vues par STED (*c*) apparaissent avec une résolution bien meilleure que celle des meilleurs microscopes à fluorescence classiques (*b*).

Aujourd'hui, le microscope optique est un outil incontournable du biologiste. Grâce à lui, on visualise des processus cellulaires aussi précis que le recrutement dynamique de calcium dans les neurones, le déplacement de molécules dans les cellules ou le devenir de protéines lors de la division cellulaire. Si de telles prouesses sont possibles, c'est en particulier grâce au développement d'une forme de microscopie, dite à fluorescence, où ce que l'on observe est la lumière produite à une certaine longueur d'onde par des molécules fluorescentes excitées à l'aide d'une source lumineuse (un laser en général).

La microscopie à fluorescence est utilisée depuis plusieurs dizaines d'années. Toutefois, avant les années 2000, il était impossible de distinguer deux structures distantes de moins de 200 nanomètres. Imposée par la nature ondulatoire de la lumière, cette limite fut décrite dès la fin du XIX^e siècle par le physicien allemand Ernst Abbe : le pouvoir de résolution est limité par la diffraction de la lumière. L'image d'un point par un microscope n'est pas un point, mais une petite tache circulaire qui masque les alentours du point.

Eric Betzig, du *Howard Hughes Medical Institute*, à Ashburn aux États-Unis, Stefan Hell, de l'Institut Max Planck de chimie biophysique de Göttingen, en Allemagne, et William Moerner, de l'Université Stanford, aux États-Unis, ont contourné cette limite par deux approches.

La première, nommée microscopie à déplétion par émission stimulée (microscopie STED), a été mise au point par S. Hell en 2000. Au lieu de simplement éclairer la zone à observer par un laser, ce qui excite toutes les molécules fluorescentes atteintes, S. Hell a eu l'idée de forcer toutes les molécules du champ éclairé à se désexciter, sauf celles situées au centre du champ, dans un volume de quelques nanomètres. Ce faisant, il impose que la région active soit inférieure à la limite de diffraction de Abbe, d'où une meilleure résolution. S. Hell utilise pour cela deux impulsions laser, l'une pour désexciter les molécules, l'autre pour déclencher la fluorescence des molécules au centre.

Quant à E. Betzig et W. Moerner, ils ont, indépendamment, posé les bases d'une nouvelle approche, la microscopie à l'échelle de la molécule unique, visant à

détecter les photons émis par chaque molécule fluorescente éclairée. En 1989, W. Moerner a montré qu'une telle détection est possible : ses collègues et lui ont observé, pour la première fois, la trace d'une molécule fluorescente unique dans un milieu dense (sous la forme d'un pic dans le spectre d'absorption de la lumière). Nombre de recherches ont été déclenchées par cette découverte, visant à améliorer la détection et à mettre au point une technique de microscopie intégrant le principe. E. Betzig, qui a participé activement à ces recherches, a ainsi été le premier, en 2006, à utiliser une telle méthode.

La microscopie à fluorescence de haute résolution n'en est qu'à ses débuts, mais progresse vite. Les deux principes récompensés sont déclinés sous de nombreuses formes, conduisant à autant de techniques toujours plus précises pour appréhender le vivant à l'échelle nanoscopique et suivre la dynamique des processus biologiques. Bientôt l'ère de la vidéonanoscopie en temps réel ?

Marie-Neige Cordonnier

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2014/

**10
nanomètres**

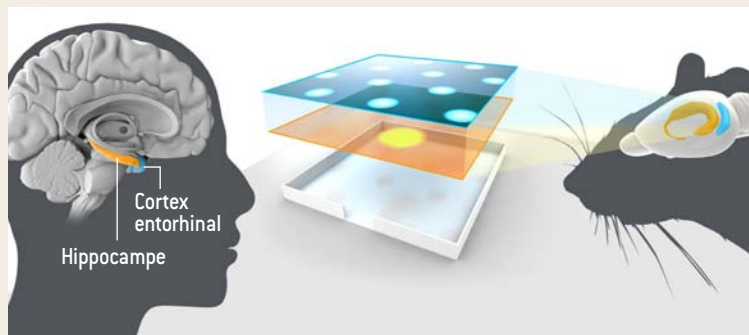
C'est ce que distinguent W. Moerner et ses collègues par imagerie super-résolue d'une petite molécule à la surface d'une bactérie vivante.*

Physiologie-médecine

La découverte d'un « GPS cérébral »

Comment savons-nous où nous sommes ? Comment pouvons-nous déterminer le chemin d'un endroit à un autre ? Et comment mémorisons-nous ces informations de façon à pouvoir retrouver immédiatement le chemin face à la même situation ? Les lauréats du prix Nobel de physiologie ou médecine 2014 ont mis en évidence dans le cerveau un « système de localisation » qui permet de s'orienter dans l'espace.

En 1971, l'Américano-Britannique John O'Keefe (aujourd'hui à l'*University College* de Londres) a découvert les premiers éléments de ce système de localisation. En utilisant des microélectrodes implantées dans le cerveau de rats, il a montré que certains neurones d'une aire cérébrale profonde nommée hippocampe étaient sélectivement activés quand l'animal était à un certain endroit dans une pièce. D'autres neurones étaient activés lorsque le rat était à d'autres endroits. J. O'Keefe en a conclu que ces « cellules de lieu » formaient un



Une cellule de lieu est un neurone qui s'active quand l'animal se trouve dans un endroit particulier (*en orange*). Une cellule de grille s'active pour un ensemble d'endroits, qui forment un maillage (*en bleu*).

© 2014 The Nobel Committee / Mathias Karlén

plan cérébral de l'environnement où se trouvait l'animal.

En 2005, les Norvégiens May-Britt et Edvard Moser ont découvert un autre élément clé de ce système de localisation. Ils ont identifié des neurones qui définissent un système de coordonnées spatiales. Ces neurones, qualifiés de « cellules de grille », sont situés dans le cortex entorhinal, fortement connecté à l'hippocampe. Chacun s'active pour de multiples positions de l'animal dans l'environnement, régulièrement espacées et formant une grille à mailles hexagonales.

Par la suite, les époux Moser ont montré que les neurones de grille étaient connectés à d'autres neurones, codant par exemple l'orientation de la tête. Tous ces neurones envoient des terminaisons nerveuses dans l'hippocampe et interagissent avec les cellules de lieu pour former un système de navigation performant.

D'abord découverts chez les rats, les neurones de lieu et de grille ont ensuite été trouvés chez d'autres mammifères, dont l'homme. Les études sur ce dernier se fondaient notamment sur des microélectrodes implantées

dans le cerveau de patients épileptiques (chez qui on cherchait le « foyer épileptique », c'est-à-dire la zone d'où partaient les crises).

Les cellules de lieu pourraient représenter les endroits où l'on est, mais aussi ceux d'où l'on vient et ceux vers lesquels on va. Même s'ils ne codent pas directement les souvenirs, ils seraient essentiels à la mémoire spatiale. Dans la maladie d'Alzheimer, cette mémoire se dégrade d'ailleurs quand l'hippocampe se détériore.

**Philippe Ribeau-Gésippe
et Guillaume Jacquemont**

www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2014/

Physique

Une récompense pour les LED bleues

La technologie de l'éclairage est révolutionnée par les diodes électroluminescentes, ou LED (pour *Light-Emitting Diodes*). Or cette révolution a été rendue possible par la mise au point, dans les années 1990, de LED émettant de la lumière bleue. En effet, on savait fabriquer des LED, dispositifs à base de semi-conducteurs, qui émettaient dans le rouge ou le vert, mais pas dans le bleu, ce qui empêchait de réaliser des lampes à LED émettant de la lumière blanche (obtenue par superposition de trois lumières colorées).

La réalisation de LED émettant dans le bleu est restée un

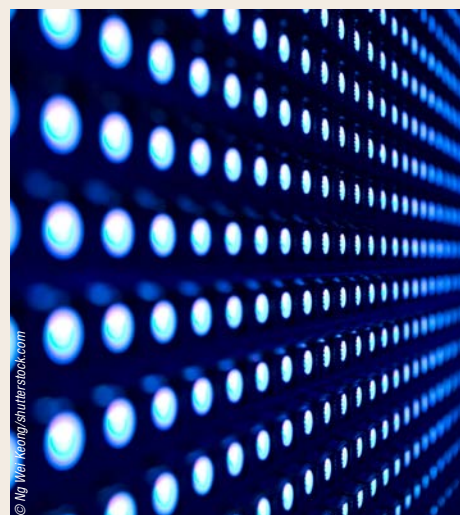
défi pour les scientifiques et ingénieurs pendant trois décennies. Le défi a finalement été relevé par Isamu Akasaki et Hiroshi Amano, à l'Université de Nagoya au Japon, et Shuji Nakamura, qui travaillait à l'époque chez *Nichia Chemicals*, une petite compagnie à Tokushima. Le Nobel leur revient.

La mise au point de LED blanches est un bouleversement pour l'industrie de l'éclairage, car ces nouvelles sources de lumière consomment très peu d'électricité par rapport aux autres sources. Le record le plus récent est un flux lumineux de 300 lumens par watt consommé, contre 16 lumens par watt pour les ampoules à incan-

descence et environ 70 lumens par watt pour les ampoules fluorescentes. Sachant que l'éclairage représente 20 à 25 % de la consommation mondiale d'électricité, le remplacement des sources actuelles par des LED permettra de réaliser de notables économies d'énergie. Qui plus est, les LED ont une durée de vie environ 100 fois supérieure à celle d'une ampoule à incandescence et 10 fois supérieure à celle d'une ampoule fluorescente, d'où des économies en coûts et en matériaux.

Maurice Mashaal

www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/



Les LED bleues nécessitent des semi-conducteurs à « gap » élevé, à l'origine des difficultés.

Les plus anciennes mains



L'art pictural est censé être né en Europe au Paléolithique supérieur, comme en témoignent de nombreuses grottes ornées. Toutefois, Maxime Aubert, de l'Université de Wallogong en Australie, et ses collègues viennent d'établir que des dessins de mains réalisés « au pochoir » découverts dans des grottes de l'île de Sulawesi, en Indonésie, datent d'environ 40 000 ans, ce qui en fait les plus anciennes œuvres figuratives connues de l'humanité. Ainsi, il y a quelque 40 000 ans, des hommes ou des femmes pratiquaient des arts picturaux figuratifs semblables aux deux extrémités de l'Eurasie.

Médecine

Des bactéries qui modulent l'appétit

Anorexie, boulimie... Les troubles alimentaires sont fréquents et constituent une véritable épidémie. Qu'est-ce qui dérègle à ce point notre comportement alimentaire ? L'équipe de Sergueï Fetissov, de l'Inserm (UMR 1073 Inserm/Université de Rouen) a mis au jour l'influence de certaines bactéries intestinales sur la sensation de faim.

Les biologistes ont montré que les colibacilles (*Escherichia coli*) de la flore intestinale fabriquent une protéine nommée ClpB, dont la structure est voisine de celle de la mélanotropine, une hormone impliquée dans la satiété. En présence de la protéine ClpB, le système immunitaire produit des anticorps pour la neutraliser, mais ces derniers se lient aussi à la mélanotropine et modifient son effet sur la satiété. Les biologistes ont ainsi constaté que le com-

portement alimentaire de souris changeait lorsqu'ils introduisaient des bactéries *E. coli* dans leur intestin. En revanche, des bactéries mutées qui ne fabriquaient pas la protéine ClpB n'avaient pas cet effet.

Les anticorps n'empêchent pas la mélanotropine d'agir, mais ils modifient ses interactions avec son récepteur cellulaire. Cela pourrait conduire tantôt à l'atténuation de la sensation de faim, tantôt à son augmentation. Les mécanismes, complexes, sont à l'étude.

Pour confirmer l'existence de ce phénomène chez l'homme, les biologistes ont effectué des prélèvements sanguins chez des patients souffrant de troubles alimentaires. Ces patients présentaient un taux anormalement élevé d'anticorps dirigés contre la protéine ClpB, ce qui suggère que ces anticorps sont liés à

la perturbation de la sensation de faim. En outre, la concentration d'anticorps variait de conserve avec la gravité des symptômes cliniques, identifiés grâce à un questionnaire standardisé.

G. J.

N. Tennoune et al., *Translational Psychiatry*, en ligne le 7 octobre 2014



Technologie

Un mur intelligent pour contrôler les ondes

Nous vivons aujourd'hui dans un monde connecté. Tous nos appareils – ordinateurs, téléphones, tablettes, etc. – exploitent des technologies sans fil, mais nous nous agaçons souvent d'avoir un signal trop faible ou erratique. L'équipe de Geoffroy Lerosey et Mathias Fink, de l'Institut Langevin à Paris (ESPCI ParisTech et CNRS), a mis au point un système qui pourrait grandement améliorer les performances des systèmes sans fil utilisant des micro-ondes, tel le Wi-Fi.

Lorsqu'un signal émis par une antenne se propage dans un bâtiment, il est réfléchi par

de nombreux obstacles – murs, meubles, etc. Ainsi, le signal capté par une antenne réceptrice est la somme des différentes ondes arrivant par des chemins variés. L'inconvénient est que ces ondes arrivent avec un certain déphasage les unes par rapport aux autres. Celui-ci influe sur l'intensité du signal et en moyenne, comme les déphasages sont aléatoires, le signal est dégradé et souvent d'amplitude faible.

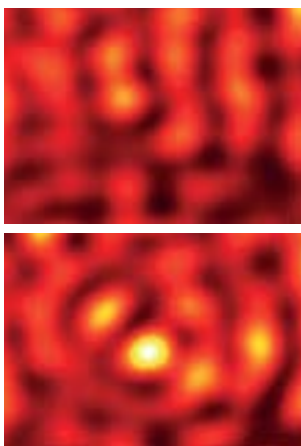
M. Fink et ses collègues ont développé un système qui recycle l'énergie électromagnétique incidente dans une pièce en augmentant l'amplitude du signal au point où se trouve le

récepteur. L'idée est d'introduire dans la pièce un miroir composé d'une centaine de réflecteurs qui corrigent le déphasage des différentes ondes réfléchies afin que l'intensité du signal soit maximale au niveau du récepteur.

Les chercheurs ont montré qu'ils peuvent multiplier l'intensité du signal reçu par un facteur proche de 10. Il est alors possible de diminuer la puissance de l'émetteur. De nombreux développements sont possibles : gérer plusieurs fréquences d'émission, plusieurs récepteurs...

S. B.

N. Kaina et al., *Scientific Reports*, vol. 4, article 6693, 2014



L'intensité du signal au niveau de l'antenne de réception sans le miroir (en haut) et avec (en bas).