

■ POUR LA

SCIENCE

PÉTRA

Sur les traces
des
Nabatéens

Août 2015 - n° 454

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American



Des océans tombés du ciel

Enquête sur l'origine de l'eau terrestre

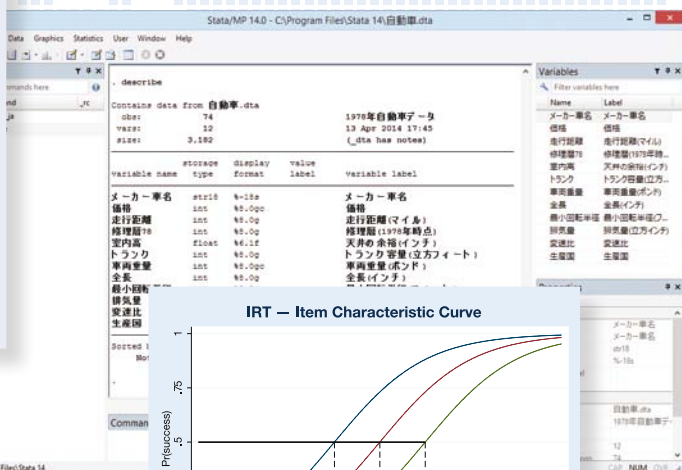
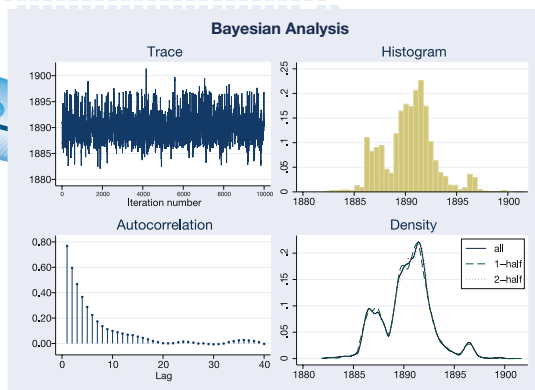
M 02687 - 454 - F: 6,50 € - RD



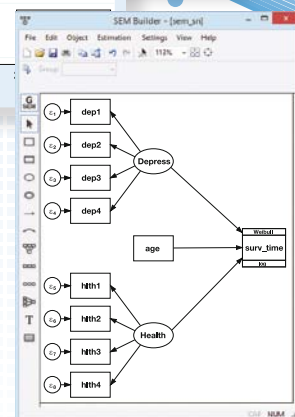
Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF.

STATA[®] 14

release



- Analyse Bayésienne
- Modèles de survie multi-niveaux et données de panel
- Effets de traitement endogène
- IRT (estimation des paramètres d'item et de sujet)
- Modèles multi-niveaux pour les données de survey
- Modèles Markov-switching
- Unicode
- Et bien plus encore...



STATISTIQUES



GRAPHIQUES



GESTION DE DONNÉES



Distributeur officiel en Suisse



Distributeur officiel en France, Belgique et Luxembourg

SCIENTIFIC SOLUTIONS SA
Rue du Midi 2, CH-1009 Pully-Lausanne, Suisse
+41 (0) 21 711 15 20 www.scientific-solutions.ch

RITME
34 Bd Haussmann, 75009 Paris, France
+33 (0) 1 42 46 00 42 www.ritme.com

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

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

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe,
assisté de Dylan Beiner (stagiaire)

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Ingrid Leroy,
Nathalie Ravier (stagiaire)

Correction et assistance administrative : Maud Bruguière

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet, assistées de Héloïse
Clément (stagiaire)

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 :

Adrien Coffinet, Valérie Dufour, Eitan Haddok, Éric Lagadec,
Miguel Montargès, Antoine Moreau, Christophe Pichon, Daniel
Tacquenot, Haiyan Tong

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

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-Œies - 1130 Bruxelles.

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guterl. 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

interdit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de

l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du

droit de copie [20 rue des Grands-Augustins -

75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Préhistoire d'eau

Nous avons souvent lu ou entendu que les océans occupent 70 % de la superficie de notre planète. Nous sommes beaucoup moins familiers avec l'affirmation que cette eau ne représente que 0,02 % de la masse de la Terre ! Ce liquide, précieux parce que la vie sur Terre en est tributaire, est donc rare. Sans oublier qu'il s'agit là d'eau salée, à laquelle nous autres animaux terrestres ne sommes pas adaptés, et que l'eau douce est encore plus rare – c'est même un facteur de conflit dans plusieurs régions du monde...

Un liquide venu des comètes ? Des astéroïdes ?

Certes, l'eau n'est pas si abondante que cela sur notre globe. Mais parmi les planètes et satellites évoluant au sein du Système solaire, la Terre est l'un des rares corps à en détenir aujourd'hui en quantités notables sous forme liquide. D'où est venue cette eau ? Des comètes, des astéroïdes ? À quel(s) moment(s) notre planète, qui était à ses débuts une boule de magma brûlant, l'a-t-elle acquise ? Selon quels processus ?

L'enjeu de ces questions n'est pas seulement de mieux comprendre l'histoire de notre planète depuis sa formation, il y a environ 4,5 milliards d'années. En éclairant les mécanismes par lesquels de l'eau peut migrer d'une région à l'autre au sein d'un système planétaire, ces recherches aideront peut-être à localiser des exoplanètes où de l'eau liquide serait présente en abondance, avec en filigrane l'espoir d'y découvrir des formes de vie.

L'origine de l'eau sur Terre occupe les astrophysiciens depuis longtemps. Des travaux et résultats récents, dont ceux de la sonde Rosetta, ont renouvelé le débat scientifique et conduit à des hypothèses originales. David Jewitt et Edward Young, deux spécialistes, décrivent dans ce numéro (voir pages 26 à 34) les dernières avancées sur cette question... qui n'est pas encore close ! ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 La plus vieille tortue du monde est un lézard
- 8 Maladie de Parkinson : des neurones envahis par des rubans et des fibres
- 11 Des chaînes coopératives pour comprendre la transition vitreuse
- 12 La première génération d'étoiles de l'Univers enfin détectée



Retrouvez plus d'actualités sur
www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Expérimentation animale : il faut donner son plein effet à la loi
Sonia Canselier
- 16 **Entretien**
Terres rares : « Nous avons en Europe un grand potentiel et un grand savoir-faire »
Dominique Guyonnet
- 20 **Lu sur SciLogs.fr**
Les vertus pédagogiques de Kaamelott
Richard Taillet
- 22 **Homo sapiens informaticus**
Que devient notre schizophrénie ordinaire ?
Gilles Dowek
- 24 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Le danger invisible de l'hôpital
Gérald Bronner

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté en cahier intérieur de toute la diffusion kiosque et posé sur toute la diffusion abonné. Des offres d'abonnement exceptionnelles sont proposées également en pages 35, 74 et 75.
En couverture : © Aleksandra Aleksandrova ; deeeplblue/shutterstock.com

À LA UNE

26 **ASTROPHYSIQUE** **Des océans tombés du ciel**

David Jewitt et Edward Young

De nouvelles observations relancent le débat sur l'origine de l'eau présente sur Terre : comètes, astéroïdes ou autres corps célestes ?



36 **ÉTHOLOGIE** **L'intelligence de la poule**

Carolynn Smith et Sarah Zielinsky

Loin de mériter leur réputation d'oiseaux stupides, les poules ont des capacités cognitives étonnantes. Elles sont rusées, empathiques et communiquent de façon élaborée.

42 **ARCHÉOLOGIE** **Sur les traces des Nabatéens**

Laïla Nehmé et Michel Mouton

Comment, au III^e siècle avant notre ère, une tribu caravanière a-t-elle pu ériger un riche royaume dominant le nord-ouest de l'Arabie ? Les fouilles de ses deux principales cités, Pétra et Hégira, apportent des réponses.



52 **INFORMATIQUE** **Le casse-tête mathématique de Candy Crush**

Toby Walsh

Derrière ce jeu tout simple en apparence se dissimulent des problèmes calculatoires difficiles. C'est probablement pourquoi Candy Crush est aussi addictif.



58 **GÉOGRAPHIE** **Changement climatique : les mauvaises solutions de Kiribati**

Simon Donner

La montée du niveau des mers menace à long terme les populations des îles coralliennes. Mais l'aide précipitée qu'on leur apporte menace de leur faire plus de mal que de bien. Le cas des îles Kiribati, dans le Pacifique, illustre bien cette situation.



68 **HISTOIRE DES SCIENCES** **L'eau qui gèle, une énigme au temps des Lumières**

Frédérique Rémy

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, de nombreux savants ont tenté de comprendre comment la glace se forme dans l'eau, les fleuves et la mer. Ils se sont longtemps empêtrés, en partie à cause d'un vocabulaire inapproprié.

Rendez-vous

76 **Logique & calcul**

Tous les chemins mènent au rond

Jean-Paul Delahaye

Le rotor-router, mécanisme déterministe de cheminement fondé sur des règles simples, forme des structures aux propriétés étonnantes.

82 **Science & fiction**

L'art de fabriquer des monstres

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 **Art & science**

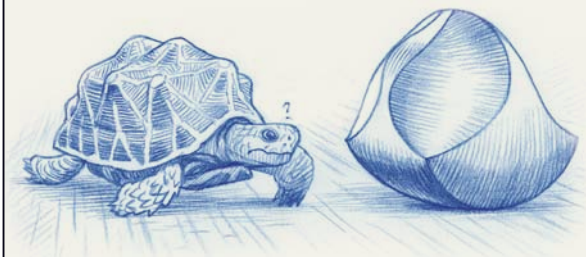
Les paréidolies artificielles

Loïc Mangin

89 **Idées de physique**

Le culbuto, la gömböc et la tortue

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



93 **Question aux experts**

L'argent fait-il le bonheur ?

Rébecca Shankland

95 **Science & gastronomie**

Légumes artificiels à foison

Hervé This

96 **À lire**

98 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE.fr

LETTRE D'INFORMATION

Ne manquez pas la parution de votre magazine avec la NEWSLETTER ÉDITORIALE !

Découvrez la sélection d'articles de *Pour la Science*, des offres préférentielles et nos autres magazines en kiosque !



Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse email sur www.pourlascience.fr

Suivez-nous sur les réseaux sociaux



Actualités

Paléontologie

La plus vieille tortue du monde est un lézard

Une forme intermédiaire entre tortue et lézard a été découverte en Allemagne. Elle résout enfin l'énigme de l'origine des tortues.



Le fossile de *Pappochelys rosinae* tel qu'il a été mis au jour. La masse noire à droite (flèche) est l'une des côtes renforcées de cette prétortue, dont une reconstitution est donnée dans l'image de droite (et au milieu, une tortue actuelle).



Un mardi de novembre, il y a 240 millions d'années. Je suis tranquillement couchée sur une branche, quand un lézard me pousse à l'eau en tentant de me mordre. Toutefois, mon blindage résiste et je lui échappe en plongeant. Si cette anecdote est vraie, elle a peut-être été vécue par *Pappochelys rosinae*. Il s'agit d'une espèce fossile de tortue qui vient d'être découverte, et qui confirme ce que l'on suspectait déjà : les tortues sont des proches parentes des lézards qui se seraient adaptées à la vie aquatique.

Pappochelys rosinae est extraordinaire : « On ne trouve un tel fossile qu'une seule fois dans sa vie, ou pas ! » s'exclame Rainer Schoch du Muséum d'histoire naturelle de Stuttgart, qui partage la découverte avec Hans-Dieter Sues, du Muséum américain d'histoire naturelle, à Washington. *Pappochelys* est l'un des fossiles que les deux

paléontologues ont extraits dans la carrière Schumann à Vellberg, dans le Bade-Wurtemberg. Une fois dégagé de sa gangue d'argilite lacustre (un fond de lac pétrifié), l'un des fossiles s'est révélé être celui, rarissime, d'une tortue (voir le cliché ci-dessus).

Comme la strate dont il provient date de 240 millions d'années, il s'agirait du plus ancien fossile de tortue à ce jour. Rainer Schoch et Hans-Dieter Sues viennent de publier la description de la nouvelle espèce et, en l'étudiant, ils ont découvert que ses caractères archaïques en font une forme intermédiaire entre les lézards triassiques et les tortues.

La trouvaille est d'un grand intérêt, car on ignorait à quels reptiles anciens l'ordre des Chéloniens, c'est-à-dire l'ordre des reptiles à carapace (les tortues), était apparenté. On situait son origine plutôt au Trias (il y a 252 à 201 millions d'années),

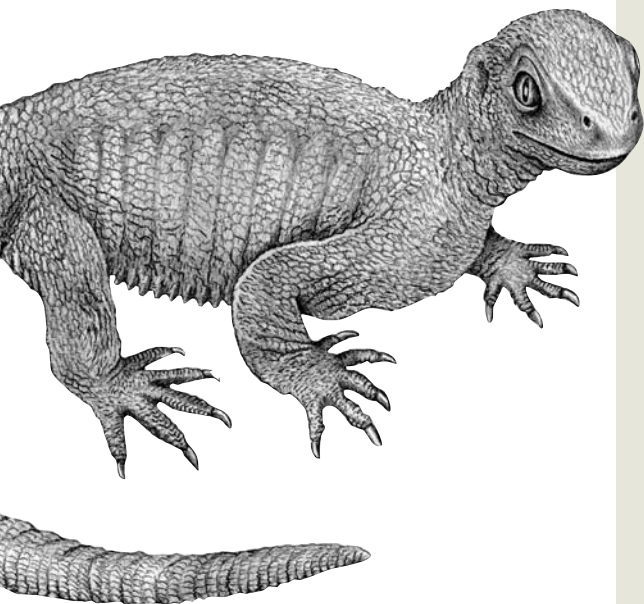
mais fallait-il relier les tortues aux lézards, aux crocodiles ou aux pré-dinosaures triassiques ? Aussi l'étude paléontologique publiée par Rainer Schoch et Hans-Dieter Sues sera-t-elle sûrement examinée par les autres spécialistes...

Pourquoi pensait-on que les tortues et les lézards triassiques étaient proches ? La découverte en 2011 d'ARN commun aux lézards et aux tortues indiquait une parenté proche. Toutefois, cette donnée et les autres données génétiques ne s'accordaient pas bien à ce que l'on savait du registre fossile.

En effet, vieux de 220 millions d'années, le reptile chinois *Odontochelys* passait pour la plus ancienne tortue : son blindage ventral était complètement ossifié, tandis que son blindage dorsal ne consistait qu'en côtes élargies. On avait aussi remarqué de telles côtes sur *Eunotosaurus*,

un reptile vieux de 260 millions d'années, qui vivait donc à la fin du Permien (298,9 à 252,2 millions d'années). Toutefois, d'après son aspect, on ne pouvait être sûr qu'*Eunotosaurus* soit bien un ancêtre des Chéloniens. La période d'apparition du plan d'organisation des tortues restait donc difficile à situer dans le temps, et les Chéloniens difficiles à relier aux lézards ou à d'autres groupes.

Ce trouble est dépassé : *Pappochelys* suggère que l'évolution de certains lézards a produit les tortues il y a quelque 240 millions d'années ou avant, au Permien peut-être. En effet, *Pappochelys* ressemble à un lézard (voir en haut à droite), qui serait doté de côtes élargies, mais pas (encore) fusionnées en un blindage ventral ossifié unique comme chez *Odontochelys*. Par ailleurs, *Pappochelys* a des dents et son crâne, comme celui des



lézards, montre deux fenêtres temporelles, au lieu d'avoir le caractère beaucoup plus massif de celui des tortues. Il est donc clair que *Pappochelys*, et avec elle les tortues, sont ce que les paléontologues nomment des Diapsides (des reptiles à deux fenêtres temporelles). Désormais, on peut être certain que les tortues sont issues des lézards, et sont apparentées aussi aux crocodiles (des lézardoïdes) et aux oiseaux.

En tout cas, pour les découvreurs de la tortue de Vellberg, «l'âge géologique de *Pappochelys* correspond exactement à la fenêtre temporelle à laquelle on s'attend pour de telles formes. Notre découverte montre à quoi a ressemblé le blindage ventral des tortues à l'origine, ce qui lui donne sa très grande signification biologique».

Et quel genre d'animal était *Pappochelys*? Long d'une vingtaine de centimètres, il ressemblait à un lézard et vivait dans un petit cours d'eau douce. Comme les iguanes marins des Galápagos, il semble qu'il ait volontiers séjourné dans l'eau. Ses côtes renforcées lui permettaient de plonger profondément et peut-être de rester plus longtemps dans l'eau que les autres lézards, par exemple pour y chasser ou y paître. Tout cela suggère que le blindage des tortues, en plus d'être une défense contre les prédateurs, serait une adaptation à la vie aquatique, ce que la tortue chinoise *Odontochelys* laissait déjà penser.

François Savatier

R. Schoch et H.-D. Sues, *Nature*, publié en ligne le 24 juin 2015

Actualités

Science et société

Maths : un impact sur 9 % des emplois

Les mathématiques sont au cœur des économies modernes. C'est ce que confirme la première étude française sur leur influence socio-économique, selon laquelle les maths concernent 9 % des emplois du pays et 15 % du PIB. Stéphane Cordier, qui dirige l'agence AMIES, commanditaire de l'étude, nous explique le sens de ces chiffres.

Quelles sont les conclusions marquantes de cette étude ?

Stéphane Cordier : Elle a confirmé la place centrale des mathématiques dans l'économie du pays : 9 % des emplois impactés, une valeur ajoutée correspondant à 15 % du PIB, un rôle dans près de la moitié des « technologies clés » du pays (imagerie médicale, sécurité informatique, etc.)...

Quand on dit que 9 % des emplois sont « impactés » par les maths, qu'est-ce que cela signifie ? Et comment calcule-t-on ce chiffre ?

S. C. : Cela signifie que 9 % des travailleurs en France utilisent les maths d'une façon ou d'une autre – sans être forcément mathématiciens. Le cabinet de conseil CMI, qui a réalisé l'étude, a calculé ce chiffre de deux façons. Il a compilé des données de l'Insee pour évaluer le nombre de travailleurs par secteur, puis il a estimé le pourcentage d'entre eux qui se servent des maths en interrogeant des experts de chaque secteur. Ce pourcentage est par exemple de 28 % pour l'automobile. Cette méthode est aussi appliquée dans d'autres pays, ce qui permet des comparaisons internationales. La deuxième méthode est fondée sur le nombre de diplômés en activité dont la formation intègre une part notable de mathématiques. Ces diplômés n'utilisent bien sûr pas toujours les maths au travail et, de façon

générale, toute méthodologie peut être discutée. Cependant, les chiffres obtenus de ces deux manières sont similaires, ce qui renforce la confiance dans les résultats. Globalement, ils semblent réalistes.

Ces chiffres paraissent pourtant énormes !

S. C. : Mais les mathématiques sont partout ! Elles sous-tendent les méthodes de modélisation, de conception, de gestion des stocks... Elles sont omniprésentes dans les métiers



Stéphane Cordier, directeur de recherche au CNRS.

liés à l'informatique ou à la finance, mais aussi dans de nouvelles entreprises telles que celles qui gèrent les vélos en libre-service, grosses consommatrices de statistiques. Les industries plus traditionnelles ne sont pas en reste. Par exemple, pour améliorer l'aérodynamisme d'une voiture, il faut résoudre les complexes équations qui décrivent l'écoulement des fluides.

Comment pense-t-on que ces chiffres évolueront ?

S. C. : Ils devraient fortement augmenter. En

effet, les secteurs les plus consommateurs de mathématiques ont une croissance supérieure à la moyenne. On risque d'ailleurs de manquer d'experts. De façon générale, les mathématiciens sont très demandés : selon une enquête réalisée en 2013, 94 % des docteurs en mathématiques d'Île-de-France ont trouvé un emploi six mois après leur soutenance, contre 79 % sur l'ensemble des autres disciplines.

Recherche académique et industrie marchent-elles main dans la main pour exploiter ce potentiel ?

S. C. : Pas assez. Si les grandes entreprises sont souvent en pointe et dialoguent beaucoup avec la recherche académique, ce n'est pas le cas des PME. De l'autre côté du miroir, les laboratoires de mathématiques (42 en France, pour environ 4 000 chercheurs) ont encore peu de collaborations avec le monde industriel. L'objectif d'associations comme l'AMIES (Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société) est de favoriser leur rencontre. Le nombre d'entreprises travaillant avec des laboratoires de maths est passé d'une centaine en 2011 (année de la création d'AMIES) à environ 200 en 2015, et le potentiel de croissance est énorme.

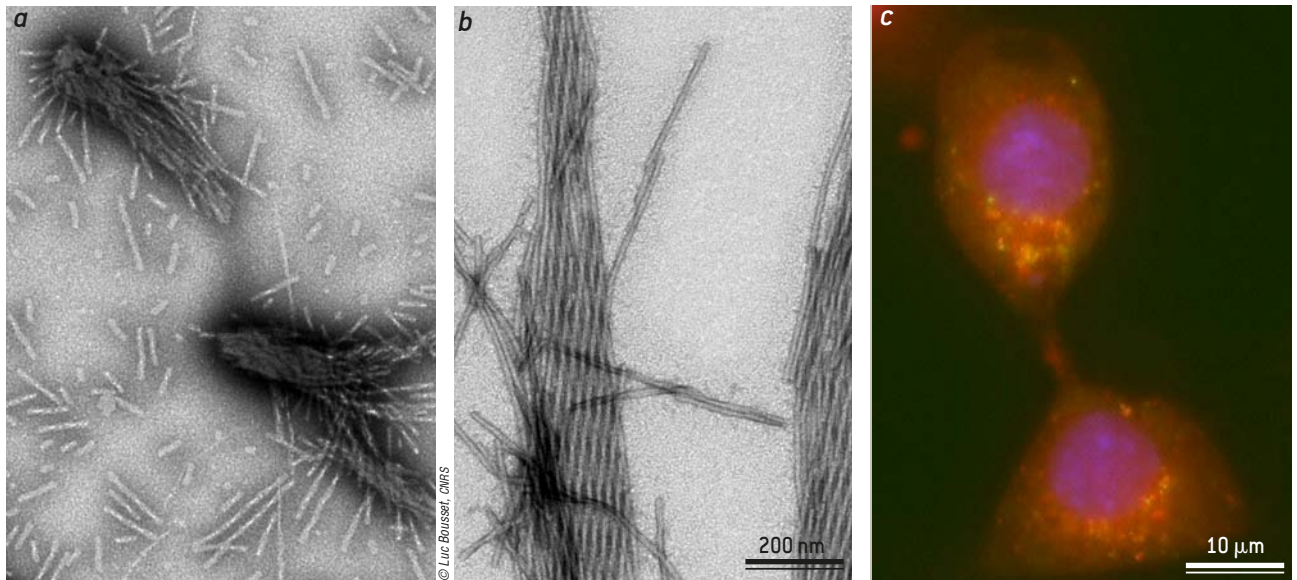
Guillaume Jacquemont

www.agence-maths-entreprises.fr/a/?q=fr/node/535

Neurosciences

Maladie de Parkinson : des neurones envahis par des rubans et des fibres

La forme des agrégats qui s'accumulent dans le cerveau lors de la maladie de Parkinson et d'autres pathologies proches influe sur les symptômes développés.



Des amas de fibres (a, b) ou de rubans se forment à partir de protéine α -synucléine soluble (c, en rouge), recrutée par les fibres déjà formées (en vert-jaune).

6,3 millions

de personnes sont atteintes de la maladie de Parkinson dans le monde, 1,2 million en Europe et 117 000 en France.*

La maladie de Parkinson, la démence à corps de Lewy et l'atrophie multisystématisée sont des pathologies neuro-dégénératives caractérisées par un même phénomène : l'accumulation d'agrégats d'une protéine, l' α -synucléine, dans les cellules du cerveau, qui entraîne leur mort. Les questions autour de cette protéine sont multiples. Quelle est sa fonction ? Pourquoi s'agrège-t-elle ? Comment différentes maladies sont associées à l'agrégation d'une même protéine ? Si la fonction de l' α -synucléine reste énigmatique, d'autres éléments de réponse se dessinent.

Notamment, on sait à présent que ces agrégats sont non pas une conséquence de la maladie, mais une cause de son développement. Et récemment, Wouter Peelaerts, de l'université catholique de Louvain, et ses collègues ont observé que la forme des agrégats détermine les caractéristiques des maladies développées.

L' α -synucléine normale est localisée à l'extrémité des neurones.

Sans structure tridimensionnelle stable, elle s'organiserait avec ses voisins en tétramères hélicoïdaux qui résistent à l'agrégation. Mais pour une raison inconnue, il arrive que les protéines deviennent anormales et s'agrègent, à l'instar des prions dans la maladie de la vache folle ou des peptides β -amyloïdes dans la maladie d'Alzheimer.

En 2013, à l'Institut des neurosciences Paris-Saclay (CNRS/université Paris-Sud), à Gif-sur-Yvette, l'équipe de Ronald Melki, coauteur de l'étude, avait montré que dans la maladie de Parkinson, la protéine α -synucléine s'agrège sous deux formes distinctes – fibres et rubans – et que les fibres tuent plus vite les cellules que les rubans. Pour savoir si la forme des agrégats influe sur les caractéristiques d'une synucléinopathie, les biologistes ont injecté quatre formes d' α -synucléine dans le cerveau de rats : fibres, rubans, extraits de cerveau de souris produisant des agrégats d' α -synucléine et oligomères (de courtes chaînes d' α -synucléine anormale).

Ils ont ainsi observé que les rubans causaient plus de dépôts que les autres formes et entraînaient la formation d'agrégats semblables à ceux détectés dans les trois synucléinopathies : des corps et des neurites de Lewy dans les neurones, comme dans la maladie de Parkinson et la démence à corps de Lewy, et, lorsque l' α -synucléine est abondante, des inclusions cytoplasmiques dans les cellules qui entourent les neurones, comme dans l'atrophie multisystématisée.

Les fibres, elles, produisaient moins de dépôts, mais déclenchaient une dégénérescence neuronale plus marquée et perturbaient les fonctions motrices, comme dans la maladie de Parkinson. Ainsi, la nature des agrégats – fibres ou rubans – expliquerait la variabilité des symptômes observée d'un patient à l'autre. Les biologistes espèrent utiliser ces structures comme biomarqueurs pour mieux caractériser chaque maladie.

Marie-Neige Cordonnier

W. Peelaerts et al., *Nature*, 10 juin 2015