



■ POUR LA

SCIENCE

Février 2015 - n° 448

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

**MATTHIEU
RICARD**

se prête à
l'expérience



Comment la méditation modifie le cerveau

Ses bienfaits
vus au scanner



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

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

Cerveau & Psycho • L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédacteurs en chef adjoints : Sébastien Bohler

et Bénédicte Salthun-Lassalle

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 :

Évelyne Host-Platret, Bernard Marty, Sébastien Michelin,

Anne-Hélène Olivier, Lionel Pernet, Christophe Pichon.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.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 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 Ameri-

can » 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).



À l'heure où nous mettons sous presse, l'équipe de *Charlie Hebdo* a subi un odieux attentat.

Pour la Science tient à exprimer sa totale solidarité et compassion, et à rappeler que les libertés de la presse et de l'expression sont des valeurs fondamentales qui ne doivent céder devant aucun fanatisme.



Méditer sous IRM

Observer le cerveau en activité est possible depuis un certain nombre d'années déjà, grâce à des techniques élaborées telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou la tomographie par émission de positrons. Même si l'interprétation des images obtenues est loin d'être aisée, de telles observations constituent un pan important des neurosciences d'aujourd'hui.

Il est ainsi crucial pour les scientifiques de déterminer comment telle ou telle activité mentale se traduit dans le cerveau – quels sont les aires et réseaux cérébraux impliqués, à quels moments ils s'activent, avec quelle intensité, etc. Des recherches récentes ont porté sur une activité mentale particulière : la méditation, pratiquée depuis des millénaires dans différentes traditions spirituelles, religieuses ou non, et dont il existe plusieurs formes.

Une confirmation des effets positifs et une fenêtre qui s'ouvre sur les mécanismes.

Comme le détaillent dans ce numéro le moine bouddhiste Matthieu Ricard et deux neurobiologistes, Antoine Lutz et Richard Davidson, des méditants débutants ou chevronnés se sont prêtés à des expériences où l'on enregistrait leur activité cérébrale (voir pages 22 à 29).

Ces travaux ont d'ores et déjà produit des résultats remarquables. Ils ont établi les schémas d'activation des aires cérébrales en fonction des divers types de méditation. Ils ont montré que la méditation conduit à des modifications dans la structure même du cerveau. Ils ont fourni des indications sur les mécanismes à l'œuvre. Et ils confirment les bienfaits que l'on attribuait à la méditation : meilleur contrôle de l'attention, meilleure gestion du stress, etc. Avec, peut-être, des perspectives cliniques et médicales. Des découvertes à lire... et à méditer !

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

1 Édito

Actualités

- 4 Un débat entre Einstein et Bohr enfin tranché
- 5 Le devenir des déchets plastiques en mer
- 6 L'acier des cathédrales : squelette ou béquille ?



- 10 Le poker résolu par l'ordinateur
- 11 Les essaims d'insectes, des systèmes critiques ?

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 12 **Point de vue**
L'amélioration morale selon les transhumanistes : attention danger !

Marina Maestrutti

- 14 **Questions ouvertes**
Les nanoparticules nuisent-elles au cerveau ?

Anna Bencsik

- 18 **Lu sur SciLogs.fr**
Comment ma mère a survécu au numérique

Thierry Viéville

- 19 **Homo sapiens informaticus**
Les ordinateurs, des révolutionnaires ?

Gilles Dowek

- 20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Pourquoi les extraterrestres n'ont-ils pas de cheveux ?

Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement
Pour la Science brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © frikota/shutterstock.com

À LA UNE

22

NEUROSCIENCES

MÉDITATION : comment elle modifie le cerveau

Matthieu Ricard, Antoine Lutz
et Richard Davidson

Les neurosciences explorent le cerveau des méditants. Et confirment les effets bénéfiques de ces très anciennes pratiques méditatives.



30

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Le noyau, entre liquide et cristal

Jean-Paul Ebran et Elias Khan

Aplati, en poire, plutôt liquide, avec un halo... : le noyau des atomes présente toute une variété de formes et d'états. Une diversité que les physiciens commencent à expliquer.

38

ARCHÉOLOGIE

Kainua, une ville étrusque sort de terre

Martin Bentz

Mal connue, la vie quotidienne étrusque se dévoile grâce aux fouilles d'une cité abandonnée au IV^e siècle avant notre ère. Parmi les découvertes : une villa d'architecture romaine, qui a donc deux siècles d'avance...



46 **BIOPHYSIQUE** **Des tourbillons pour mieux nager**

Frank Fish et George Lauder

Poissons, dauphins ou méduses se propulsent dans l'eau avec aisance. Comment font-ils ? En visualisant les écoulements, les scientifiques révèlent les divers effets hydrodynamiques en jeu.

54 **EXO BIOLOGIE** **Comment trouver la vie sur Mars**

Christopher McKay et Victor Parro García

L'eau a coulé sur Mars, mais cela a-t-il suffi pour que la vie s'y développe ? Une nouvelle génération d'instruments, capables de détecter les traces les plus infimes de vie, permettra bientôt de répondre à cette question.



60 **EXO BIOLOGIE** **Cap sur Mars avec ExoMars et Mars2020**

Sylvestre Maurice et Michel Viso

Les missions martiennes les plus récentes ont montré que Mars a été une planète habitable. Prochain objectif : la recherche de traces d'une vie passée ou encore présente.

62 **SOCIOLOGIE** **Stephen Hawking, le mythe du génie solitaire**

Hélène Mialet

Chercheur brillant mais lourdement paralysé, le théoricien britannique est, contrairement à l'image qu'on se plaît à donner de lui, l'antithèse du savant solitaire armé de la seule puissance de son cerveau.

Rendez-vous

70 **Histoire des sciences**

Un teinturier du Languedoc à la conquête du Levant

Dominique Cardon

Un mystérieux carnet de teinturier éclaire l'importance, au XVIII^e siècle, de la maîtrise des couleurs dans la concurrence entre drapiers européens pour conquérir les marchés d'Orient.

76 **Logique & calcul**

Les mathématiques de l'origami

Jean-Paul Delahaye

L'étude mathématique de l'art du papier plié est récente et révèle des liens étroits avec l'algèbre, la théorie des nombres ou l'algorithmique.

82 **Science & fiction**

Yoda, un amphibien d'une galaxie lointaine est-il ?

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 **Art & science**

Dans la tête d'un requin-marteau

Loïc Mangin

86 **Idées de physique**

Refroidir avec des aimants

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 **Question aux experts**

Faut-il prendre des notes à la main ou à l'ordinateur ?

Cynthia May

91 **Science & gastronomie**

L'alcool, préhispanique aussi

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 théorique

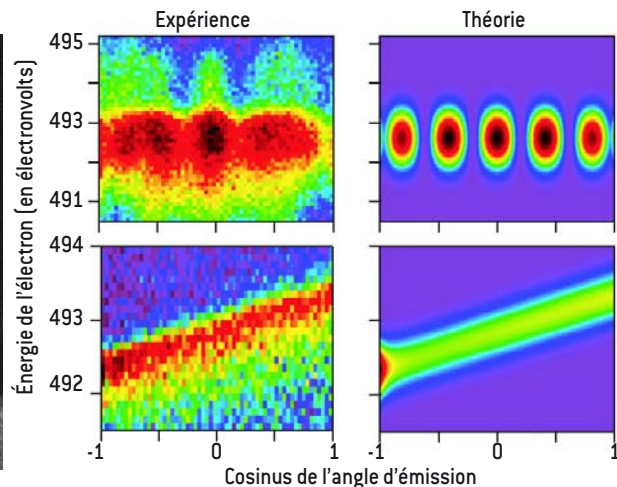
Un débat entre Bohr et Einstein enfin tranché

Une expérience de pensée d'Albert Einstein est devenue réalité au synchrotron Soleil.

Le père de la relativité voulait défier la mécanique quantique, mais le résultat lui donne tort...



Dans les années 1920, Niels Bohr et Albert Einstein ont confronté leur vision de la mécanique quantique à l'aide d'expériences de pensée. Catalin Miron et ses collègues ont conçu l'équivalent d'une de ces expériences – une version de l'expérience des fentes de Young



modifiée par Einstein – avec une molécule de dioxygène qui émet un électron. Si l'atome qui émet l'électron n'est pas identifiable, on obtient une figure d'interférence (*ci-dessus, en haut*). Dans le cas contraire, la figure d'interférence disparaît (*ci-dessus, en bas*).

Albert Einstein pensait que la mécanique quantique allait à l'encontre des principes de la physique. À partir de 1927, et durant plusieurs années, il a confronté son point de vue à celui du physicien danois Niels Bohr dans des discussions restées célèbres. Einstein a imaginé diverses expériences de pensée pour tenter de mettre en évidence des failles dans l'édifice de la physique quantique. L'un de ces tests imaginaires est une version améliorée de l'expérience classique des fentes de Young. À l'époque, les limitations techniques ne permettaient pas de la réaliser. C'est aujourd'hui chose faite. Catalin Miron, physicien au synchrotron *Soleil*, près de Paris, et son équipe ont réalisé une expérience analogue à celle imaginée par Einstein. Et le résultat lui donne tort!

L'une des notions les plus déroutantes de la mécanique

quantique est la dualité onde-corpuscule. Chaque objet quantique peut se comporter comme une onde et comme une particule. La lumière, par exemple, peut être vue comme une onde électromagnétique ou comme un flux de particules individualisées, les photons. En 1927, le physicien allemand Werner Heisenberg a proposé son principe d'incertitude, qui stipule qu'on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision supérieure à un seuil limite. Pour Bohr, ce principe d'incertitude est la manifestation d'un principe plus fondamental, celui de complémentarité : un objet quantique ne peut se comporter simultanément comme une onde et comme un corpuscule.

Dans la version initiale de l'expérience de Young, on éclaire une plaque percée de deux fentes parallèles et proches. Une onde

lumineuse passe simultanément par les deux fentes et crée une figure d'interférence (une alternance de bandes claires et sombres) sur un écran placé derrière la plaque. Mais si on envoie les photons un par un, que se passe-t-il ? Sait-on par quelle fente passe chaque photon ? Si cette information n'est pas connue (en l'absence de détecteur sur les fentes), on observe que l'accumulation des photons sur l'écran crée aussi une figure d'interférence. En revanche, suivant le principe de complémentarité, si l'on place un détecteur sur une fente, ce qui permet de savoir par quel chemin le photon est passé, on n'obtient plus de figure d'interférence.

Einstein, qui n'était pas convaincu par la validité du principe de complémentarité, a essayé de le mettre en défaut en reprenant l'idée de l'expérience de Young. Quand une particule

passe par une fente, elle la touche et change de direction avant d'atteindre l'écran, transmettant aux bords de la fente un peu de sa quantité de mouvement.

Einstein proposa que l'une des fentes soit mobile et rattachée à un ressort. Ce dispositif ne mesure que la quantité de mouvement transférée. Cette mesure, selon Einstein, ne perturbe pas la particule lors de son passage, comme si le détecteur était absent. Einstein avança donc que la figure d'interférence serait toujours présente. Une telle mesure était cependant irréalisable avec les moyens techniques de l'époque.

Depuis, plusieurs équipes ont monté des expériences essayant de mettre en œuvre l'idée d'Einstein. En particulier, en 2001, l'équipe française de Serge Haroche a montré qu'il est possible de manipuler des systèmes à l'échelle de l'atome. Cela a ouvert la voie à

Écologie

Le devenir des déchets plastiques en mer

Plus de 5 000 milliards de débris plastiques flottent à la surface des océans, selon une récente étude internationale, soit plus de 260 000 tonnes. Ces chiffres ne correspondraient qu'à une infime part de la pollution plastique océanique. Éclairage de François Galgani, océanographe à l'Ifremer, à Bastia, et coauteur de l'étude.

une mesure analogue à celle requise dans l'expérience d'Einstein.

C. Miron et ses collègues ont étudié un système qui est une réalisation fidèle, à l'échelle atomique, de l'idée de transfert de quantité de mouvement entre la particule et la fente suggérée par Einstein : des molécules de dioxygène (O_2) bombardées par des rayons X du synchrotron *Soleil*.

Quand un photon X frappe une molécule de dioxygène avec une énergie de 541,8 électronvolts, la molécule absorbe le photon et est excitée. En se désexcitant, elle émet un électron. Il est alors impossible de savoir lequel des deux atomes de la molécule a émis l'électron. La mesure de l'énergie de l'électron éjecté en fonction de l'angle d'émission présente des motifs d'interférence similaires à ceux de l'expérience des fentes de Young.

A contrario, lorsque l'énergie du photon X est de 539 électronvolts, la molécule se dissocie et l'un de ses deux atomes émet un électron, mais la mesure du recul de l'atome permet de déterminer duquel il s'agit. Cela revient à savoir par quelle fente la particule est passée dans l'expérience de Young. Or en faisant les mêmes mesures, on n'obtient plus d'interférences.

Ainsi, dans le cas où il est possible de déterminer la « voie de passage » par la mesure du recul (c'est-à-dire du transfert de quantité de mouvement), la figure d'interférence n'est plus visible, contrairement à ce que pensait Einstein. Le principe de complémentarité de Bohr est donc vérifié – une confirmation de plus de notre compréhension du monde quantique.

Sean Baillly

Xiao-Jing Liu et al., Nature Photonics, en ligne le 1^{er} décembre 2014

Qu'apporte votre étude par rapport aux précédentes ?

François Galgani : C'est une compilation de données issues de 24 expéditions entre 2007 et 2013 à travers les cinq gyres (tourbillons) océaniques subtropicaux, aux abords de l'Australie, dans la baie du Bengale et en Méditerranée. Avec ces données, nous avons validé un modèle de transport de surface des particules plastiques et montré que les accumulations correspondent aux prévisions du modèle. C'est la première étude d'une aussi grande envergure et effectuée en fonction de la taille des débris.

Comment a été construit le modèle utilisé ?

F. G. : On est parti d'un modèle de circulation développé par la Marine américaine dans les années 1970. Le modélisateur de l'étude, Laurent Lebreton, en a extrait la partie qui concerne la couche de surface – les quelques mètres de profondeur où flottent les débris plastiques – et l'a couplée à des outils de simulation du comportement de particules dans un fluide.

L'étude a détecté moins de microplastiques – inférieurs à 4,5 micromètres – qu'attendu. Pourquoi ?

F. G. : Plusieurs pistes sont possibles. Lucy Woodall, du Muséum britannique d'histoire naturelle, et ses collègues ont récemment proposé que des microparticules couleraient au fond de la mer. Cette

idée ne fait pas l'unanimité. La plupart des microplastiques ont une faible densité et on comprend mal comment ils sédimenteraient. Autre piste : les procellariiformes, oiseaux dont l'albatros fait partie, avalent des débris, alors stockés dans une poche de l'estomac. Une espèce en mer du Nord prélève ainsi quelques dizaines de tonnes de déchets par an. Mais cela n'explique pas tout. En fait, la seule explication convaincante est liée à la dégradation des débris. Plus les particules se



François Galgani est océanographe à l'Ifremer.

fragmentent, plus le rapport surface sur poids des déchets est important. Cela augmente leur accessibilité à des bactéries qui contribuent à leur fragmentation en les digérant, ce qui accélère le processus.

Quel est l'impact des déchets plastiques marins ?

F. G. : La dégradation des microdéchets n'est pas dangereuse, car leurs constituants principaux, des polymères de propylène, éthylène, etc., sont inertes, et les quantités d'additifs toxiques libérés, infimes. Le danger chimique vient des macrodéchets, bien

plus importants en poids. Les microdéchets, plus nombreux, transportent des organismes sur de longues distances, déséquilibrant ainsi des écosystèmes ou disséminant des agents pathogènes. Après le tsunami de 2011, 120 espèces sont passées du Japon au Canada par ce biais. De plus, des espèces sont particulièrement sensibles aux déchets, et même le tourisme, la santé humaine (blessures), la pêche et la navigation sont touchés.

Observe-t-on les mêmes effets en Méditerranée ?

F. G. : En pire ! Les déchets ne peuvent pas en sortir. À Gibraltar, les eaux sont entrantes en surface et sortantes en profondeur. Or les déchets sont en surface... Des collègues slovénes ont mesuré jusqu'à cinq millions de microplastiques par kilomètre carré.

Que faire pour enrayer cette pollution ?

F. G. : C'est l'objet de la conférence internationale organisée à Monaco en mars prochain, mais déjà une directive européenne pour réduire les déchets est prévue et des gouvernements l'ont anticipée. En France, les sacs plastiques seront interdits dès 2016. L'industrie propose de favoriser le recyclage. Enfin, l'éducation jouera un rôle important : la plupart des déchets en mer sont issus de la grande consommation...

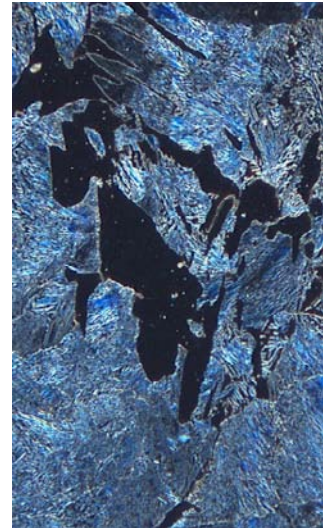
Marie-Neige Cordonnier

M. Eriksen et al., PLoS One, 2014

Archéologie

L'acier des cathédrales : squelette ou béquille ?

La datation des renforts métalliques de cathédrales gothiques révèle qu'ils ont parfois été prévus dès la conception.



Dans la cathédrale de Beauvais, des tirants métalliques empêchent les arcs-boutants qui soutiennent les murs du chœur de s'écarter. À droite, un fragment d'acier de la cathédrale vu au microscope (les parties bleues renferment un mélange de fer et de carbone).

Dans les années 1960, l'architecte Jean-Pierre Paquet a fait retirer les barres métalliques fixées entre les arcs-boutants (les piliers courbes soutenant les murs à l'extérieur) de la cathédrale de Beauvais. Il les trouvait inutiles et disgracieuses, et ne les pensait pas d'origine.

À l'instar de celle de Beauvais, la plupart des cathédrales gothiques intègrent des éléments en acier, tels des tirants (des barres fixées entre les piliers ou les murs pour éviter qu'ils ne s'écarterent). Ont-ils été prévus dès la conception ou bien intégrés plus tard pour renforcer la structure ? La question faisait débat. Une équipe interdisciplinaire menée par Stéphanie Leroy, du Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération (LAPA, CNRS), a daté au carbone 14 les renforts métalliques des cathédrales de Beauvais et de Bourges, et montré que, pour la première, ces renforts ont été utilisés dès le début de la construction.

L'histoire des cathédrales est mouvementée. La construction de celle de Beauvais débuta en 1225 et s'est étalée sur plus d'un siècle. Du fait de la durée des travaux, des réparations successives et des

divers ajouts, il est parfois difficile de savoir quand certains éléments architecturaux ont été mis en place.

Après une analyse de la structure et de la disposition des renforts métalliques, S. Leroy et ses collègues ont effectué des microprelevements, qu'ils ont datés au carbone 14. Cet élément radioactif, dont la désintégration progressive révèle le temps écoulé depuis la mort d'un organisme, provenait du charbon de bois brûlé dans les fourneaux où le minerai avait été transformé ; une petite quantité s'était alors incorporée aux métaux.

La difficulté, selon S. Leroy et Emmanuelle Delqué-Kolic, du Laboratoire de mesure du carbone 14 (CEA / CNRS / IRD / IRSN / MCC), est que « le carbone contenu dans les métaux anciens peut provenir d'autres sources et n'est présent qu'à l'état de trace ». Grâce à une étude fine de la structure des métaux ferreux et à une préparation spécifique des échantillons, les chercheurs ont réussi à extraire des quantités infimes de carbone et à les dater de façon fiable.

L'équipe de S. Leroy a d'abord validé sa méthode avec des

éléments datés par ailleurs grâce à des sources historiques et archéologiques. Puis elle l'a appliquée aux cathédrales. Les chercheurs ont trouvé qu'à Beauvais, certains renforts métalliques dataient du début de la construction, vers 1225-1240, et auraient donc été pensés dès la conception. À Bourges, cathédrale un peu plus ancienne (le chœur remonte à 1195-1214), les renforts semblent plutôt avoir été imaginés en cours de construction pour stabiliser l'édifice inachevé.

Ainsi, pour réaliser des performances architecturales inédites, les bâtisseurs de cathédrales devaient innover et tester de nouvelles techniques de construction. Les renforts métalliques sont sans doute l'un des éléments qui ont permis à ceux de la cathédrale de Beauvais d'édifier le plus haut chœur gothique du monde (46,3 mètres). J.-P. Paquet n'a pas eu une bonne idée en les retirant : lors d'une tempête en 1989, les piliers supportant les arcs-boutants se sont mis à osciller dangereusement. Des tirants de remplacement ont alors été mis en place dans les années 1990.

Guillaume Jacquemont

S. Leroy et al., *Journal of Archaeological Science*, vol. 53, pp. 190-201, 2015

46
mètres environ

C'est la hauteur du chœur de la cathédrale de Beauvais, le plus haut chœur gothique du monde.