

demande soit prise en compte. Un marché s'établit entre les mineurs et les utilisateurs. Le système, subtil, est fondé sur des idées économiques qui y jouent un rôle régulateur. Ces constructions informatiques modernes que sont les ordinateurs à blockchain ont, en leur cœur même, des unités de valeur économique qu'ils manipulent et sans lesquelles ils ne pourraient pas exister. Il faut maîtriser une forme d'« économie numérique fondamentale » pour concevoir les ordinateurs à blockchain et cela implique en particulier que les programmes déposés sur la blockchain constituent eux-mêmes des acteurs économiques.

Limites et dangers divers

Tout ce que nous avons dit est très réjouissant et semble parfait... en théorie. La délicatesse et la fragilité de ces constructions, on s'en doute, créent des risques et des difficultés. Cette informatique du futur est dans une phase expérimentale qui n'exclut pas les accidents, voire les catastrophes.

Citons six points délicats pour lesquels des progrès sont à faire avant d'envisager une utilisation à grande échelle des ordinateurs à blockchain :

- l'accroissement de la taille de la blockchain ne doit pas être sans limite, de même que la quantité de calcul exécutée par les mineurs d'un ordinateur à blockchain. On espère profiter de l'augmentation de la puissance des dispositifs informatiques, qui, selon la loi de Moore, double tous les deux ans. Cependant, cela ne permet pas tout, d'autant que la loi de Moore s'essouffle. Le trop grand succès d'un ordinateur-monde provoquerait un problème d'encombrement, voire le paralyserait ;

- les algorithmes cryptographiques utilisés pour assurer l'intégrité de la blockchain, la signature des transactions et le bon fonctionnement d'un réseau pair à pair ne sont pas sûrs à 100 %. L'exploitation d'une faille dans l'un d'eux pourrait tout démolir, d'où le soin particulier qui doit présider à leur choix et la nécessité de prévoir des procédures efficaces de substitution d'un algorithme par un autre en cas de faiblesse identifiée ;

- les programmes, même s'ils sont publics, ne sont pas nécessairement sans erreurs. Leurs bugs peuvent entraîner de graves dysfonctionnements, voire autoriser un pirate ayant repéré l'un d'eux à s'emparer de l'argent stocké dans le compte d'une DAO.

C'est ce qui s'est produit le 17 juin 2016, quand l'exploitation d'une erreur dans le programme d'une DAO de la blockchain d'Ethereum a permis à un programmeur malin (resté anonyme) de s'emparer temporairement de l'équivalent de 50 millions d'euros. Heureusement, le pirate informatique n'a pas pu les faire sortir de la blockchain et en profiter. Une opération appelée *hard fork* a permis de rendre l'argent déplacé à ceux à qui il appartenait, et tout est rentré dans l'ordre le 9 juillet, à la nuance près que des utilisateurs insatisfaits de la méthode de traitement du problème ont donné naissance à une version concurrente d'Ethereum. La leçon de cette catastrophe évitée de justesse est que les programmes pour les ordinateurs à blockchain doivent être écrits avec un soin extrême, sans doute en utilisant les méthodes mises en œuvre dans l'industrie aéronautique et les systèmes embarqués ;

- la gouvernance d'un système tel qu'Ethereum est délicate. En théorie, il n'y en a pas besoin, et seules certaines évolutions majeures du système sont effectuées à la suite du vote des mineurs qui détiennent collectivement une forme de pouvoir « démocratique » sur le système. Cependant, en cas d'urgence, une réaction rapide est parfois indispensable. Une réflexion approfondie doit être menée pour résoudre ce dilemme entre automaticité du système, utile à la création de la confiance, et réactivité, essentielle dans certaines situations ;
- rien n'empêche une DAO d'avoir été conçue pour exploiter ses utilisateurs au bénéfice de son créateur. Il faut donc pouvoir exercer un certain contrôle sur les DAO créées. Comment l'organiser sans annuler les bénéfices des principes fondateurs des DAO ?

- dernier point : le statut légal et juridique des DAO est à concevoir et définir précisément. Cela ne sera pas simple.

Expérimentale aujourd'hui, cette nouvelle technologie des ordinateurs-mondes nous réserve toutes sortes de surprises ! ■

■ L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE
est professeur
émérite
à l'université
de Lille
et chercheur

au Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille (CRISTAL).

■ BIBLIOGRAPHIE

Le projet Ethereum :
<https://www.ethereum.org>
<https://www.ethereum-france.com>

Understanding Ethereum,
CoinDesk, 2016 :
<http://bit.ly/2cTEHMK>.

J.-P. Delahaye, *Les blockchains, clefs d'un nouveau monde*,
Pour la Science, n° 449, pp. 80-85,
mars 2015 ; *Bitcoin, la cryptomonnaie*, *Pour la Science*,
n° 434, pp. 80-85, décembre 2013.

A. Kosba et al., *Hawk : The blockchain model of cryptography and privacy-preserving smart contracts*, 2015 (<https://eprint.iacr.org/2015/675.pdf>).



Retrouvez la rubrique
Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Interstellar : plongée dans le tesseract

Dans le film de Christopher Nolan, les tableaux noirs cachent plusieurs éléments de la physique théorique d'aujourd'hui. Décryptage.

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

En pleine catastrophe écologique majeure, la Terre se meurt. À court de ressources, l'humanité est à l'agonie. Un groupe de scientifiques reclus cherche une solution et propulse une petite équipe dans l'espace en quête d'une nouvelle Terre. Après un long voyage, le héros finit sa course dans un trou noir pour nous apprendre que, finalement, seul l'amour transcende l'espace et le temps.

L'accroche du film *Interstellar* (Christopher Nolan 2014), héritier revendiqué de *2001, l'Odyssée de l'espace*, est certes un peu faible. Mais cette œuvre n'en a pas moins un intérêt pédagogique, tant la science y est présente et tant la volonté du réalisateur de bien faire est incontestable. Christopher Nolan s'est d'ailleurs attaché les conseils du physicien américain Kip Thorne, spécialiste de la théorie de la relativité générale et qui a beaucoup travaillé sur le concept de trou de ver.

Dans le film, le professeur Brand tente de bâtir une théorie capable de rendre compte simultanément de toutes les interactions fondamentales – la gravitation et les interactions à l'échelle microscopique. Le professeur explique que la mise au point de cette « théorie du tout » pourrait sauver l'humanité. Outre la naïveté d'une telle prétention, il est intéressant de se demander si les équations fugitivement montrées sur les immenses tableaux noirs de son bureau ont la moindre signification pour un physicien.

Sur le premier tableau (*page ci-contre, à gauche*), un dessin représente notre Univers



LE FILM INTERSTELLAR entraîne le spectateur à travers des trous de ver et sur des exoplanètes tout en essayant de coller le plus possible à la rigueur scientifique.

comme une surface ou « brane » (*our brane 0*) prise en sandwich entre deux autres (*confining brane 1, confining brane 2*), décalées par rapport à la nôtre dans une dimension perpendiculaire. Clairement, le professeur Brand construit sa théorie dans un superspace – le *bulk* – ayant plus de dimensions que nous n'en percevons.

En 1999, les physiciens américains Lisa Randall et Raman Sundrum proposèrent justement un modèle selon lequel notre univers n'est qu'un sous-ensemble d'une structure ayant davantage de dimensions. Ce *bulk* y est décrit par un espace à cinq dimensions qualifié d'anti de Sitter (noté AdS_5 sur le tableau). La motivation des deux physiciens était d'expliquer la faiblesse de la gravitation vis-à-vis des autres interactions à l'échelle microscopique : ainsi, l'attraction gravitationnelle entre le proton et l'électron d'un atome d'hydrogène est 10^{39} fois plus faible que la force électrique qui les lie.

Imaginons alors que notre univers tridimensionnel soit plongé dans un espace doté d'une dimension spatiale supplémentaire et que toutes les interactions restent confinées dans les trois dimensions usuelles, sauf la gravité. Comme elle peut s'étendre dans toutes les dimensions, la gravité semblerait alors subir des « fuites », qui se traduiraient par son apparente faiblesse dans notre espace tridimensionnel.

L'intimidante formule du second tableau confirme cette interprétation. Elle exprime l'« action effective » de la théorie du professeur

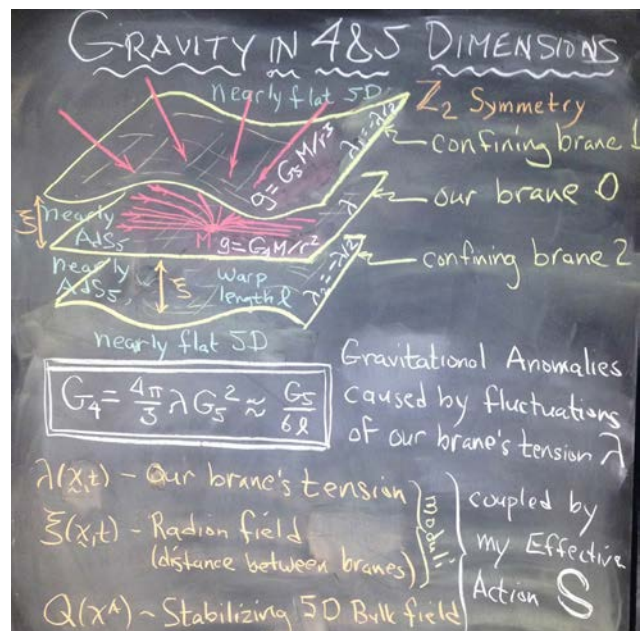
MY EQUATION
for the Effective Action $S(\lambda, \xi, Q, \dots)$

$$S = \int \sqrt{-g_5} d^5x \left\{ \mathcal{L}_{\text{bulk}} + \sum_{\text{branes } a=0,1,2} \delta(\sigma(x^4) - \sigma_a) \mathcal{L}_{\text{brane}}^a \right\}$$

Where!

$$\mathcal{L}_{\text{bulk}} = \frac{1}{16\pi G_5} (R_5 - 2\Lambda_5) - \frac{1}{2} \nabla_\mu Q \nabla^\mu Q - \frac{1}{2} U(Q) - \frac{1}{2} \sum_{\text{auxiliary fields } i,j} H_{ij}(Q^2) \nabla_\mu \Phi^i \nabla^\mu \Phi^j$$

$$\mathcal{L}_{\text{brane}}^0 = \frac{k}{16\pi G_5} + \frac{1}{2} (Q^2 - \lambda) \nabla_\mu \xi \nabla^\mu \xi + \frac{1}{2} \nabla_\mu \lambda \nabla^\mu \lambda + \frac{1}{2} \sum_{i,j} W_{ij} \Phi^i \Phi^j \mathcal{M}(\text{standard model fields}) + \frac{1}{2} V(\sqrt{(\xi - \xi_0(Q^2))^2 + (\lambda - \lambda_0(Q^2))^2}) + (\text{Standard Model Terms})$$



LES TABLEAUX NOIRS DU PROFESSEUR BRAND dans le film *Interstellar* sont couverts de formules de physique théorique, où s'entremêlent de façon relativement fidèle à la science les concepts de dimensions supplémentaires et ceux de la physique quantique.

Brand. En physique, l'« action » est une grandeur ayant pour dimension le produit d'une énergie par un temps. Son importance est due à un principe très général, le principe de moindre action : le trajet effectivement suivi par un objet entre deux points donnés est celui qui conduit à un extremum (maximum ou minimum) de l'action. Ainsi, en mécanique, au lieu de penser la trajectoire à partir de forces, on l'imagine comme la courbe qui optimise l'action. Ce principe de moindre action est simple, puissant et général, non seulement en mécanique classique, où il est strictement équivalent aux lois de Newton, mais aussi en électromagnétisme et en mécanique quantique ou relativiste. Sa généralisation a été si fructueuse qu'elle fonde toute la physique théorique moderne.

Les termes g_5 et d^5x présents dans l'équation de Brand indiquent que sa théorie est bien construite à cinq dimensions : une de temps et quatre d'espace. Le problème est qu'il a été montré que le « sandwich AdS_5 » est instable, car les deux branes qui confinent la nôtre subissent une compression. Dans son équation, Brand tente donc d'écrire une action effective qui pourrait résoudre ce problème : elle contient des termes associés à chaque brane (numérotée 0, 1 ou 2) et un terme associé au *bulk* censé stabiliser l'ensemble. La quête du professeur, l'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique, n'est toujours pas achevée aujourd'hui. Diverses approches telles que la gravité quantique à boucles, la théorie des

cordes ou la géométrie non commutative font l'objet d'intenses recherches.

Interstellar aborde d'une autre façon, plus visuelle, la question des dimensions spatiales supplémentaires. Vers la fin du film, Cooper, l'un des astronautes, pénètre dans le trou noir Gargantua qui est au cœur de l'intrigue. Il se retrouve alors dans un espace-temps étrange, le « tesseract ». En géométrie, le tesseract est un objet quadridimensionnel qui est au cube ce que le cube est au carré. De même que la surface d'un cube est constituée de six faces carrées, l'hypersurface délimitant un tesseract est constituée de huit cellules cubiques.

Voir les dimensions supplémentaires

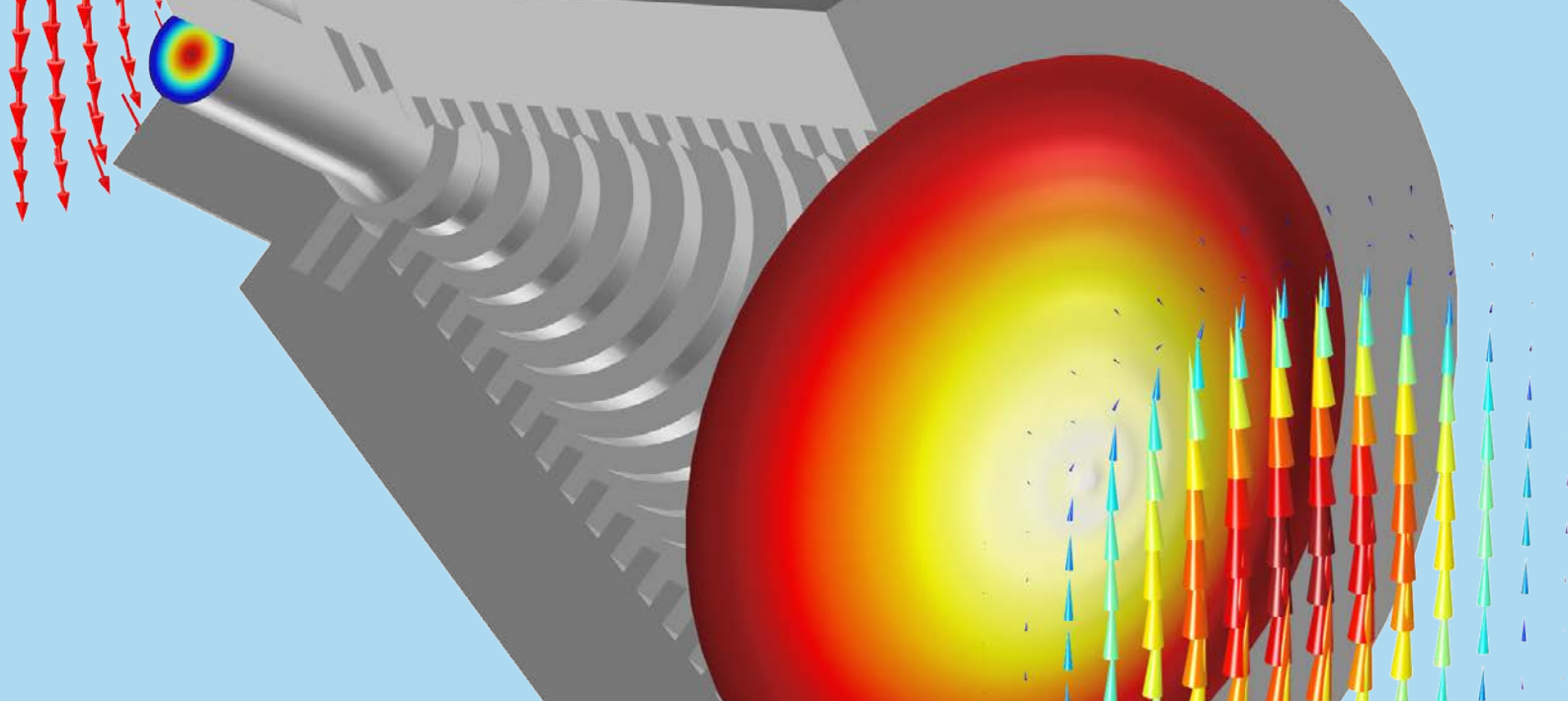
Dans le film, cette structure géométrique permet à Cooper de passer de la singularité centrale du trou noir au *bulk* à cinq dimensions. Il se retrouve alors hors de notre brane et, pour lui, le temps devient l'analogue d'une dimension spatiale. C'est pour cela qu'une fois dans le tesseract, Cooper voit la chambre de sa fille Murph, la future adjointe du professeur Brand, multipliée à l'infini mais avec des temporalités différentes. Il est alors capable de communiquer avec elle à travers le temps au moyen de signaux gravitationnels, fournissant les données dont elle a besoin pour résoudre l'équation du professeur Brand.

Par ses propriétés fascinantes, le tesseract apparaît dans bien d'autres œuvres. Ainsi,

dans le film *Cube 2 : Hypercube*, huit personnages sont piégés dans un tesseract qui apparaît comme un réseau de cubes connectés dont certains altèrent le déroulement du temps. Dès 1941 et sa nouvelle *La Maison biscornue*, Robert Heinlein décrivait une maison construite selon le patron tridimensionnel d'un tesseract. C'est ce même patron que Salvador Dalí utilisa pour sa peinture de 1954 *Crucifixion (Corpus Hypercubus)* suggérant que, tout comme le tesseract existe dans un espace quadridimensionnel inaccessible à l'esprit humain, Dieu pourrait exister dans une dimension qui nous est incompréhensible.

La compréhension fine de la plupart des phénomènes décrits dans *Interstellar* requiert des connaissances en relativité générale, en mécanique quantique et une touche de théorie des cordes. Le résultat est un film à la fois intéressant et intrigant, qui marie histoire forte et ambition scientifique. *Interstellar* reste une œuvre de science-fiction où liberté artistique et extrapolation scientifique font partie du jeu. Mais en invitant les spectateurs à s'interroger sur la nature de l'espace et du temps, il a une vertu pédagogique et se situe pleinement dans ce que, en 1909, Maurice Renard nommait le merveilleux scientifique, c'est-à-dire « l'aventure d'une science poussée jusqu'à la merveille ou d'une merveille envisagée scientifiquement ».

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris.



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder

