

En pleine catastrophe écologique majeure, la Terre se meurt, battue par les vents et la poussière. Les récoltes flétrissent, la nourriture manque. À cours de ressources, l'humanité est à l'agonie. Un groupe de scientifiques reclus (la NASA !) cherche une échappatoire et propulse une petite équipe dans l'espace en quête d'une nouvelle Terre. Se baladant de trous de ver en planètes exotiques, le héros finit sa course dans un trou noir pour nous apprendre que, finalement, seul l'amour transcende l'espace et le temps...

Une « théorie du tout » capable de changer notre destin ?

S'il est possible de s'accorder sur la faiblesse de l'accroche d'*Interstellar*, réalisé par Christopher Nolan et sorti dans les salles françaises en 2014, le film, héritier revendiqué du classique de Stanley Kubrick *2001, l'Odyssée de l'espace*, n'en possède pas moins un réel intérêt pédagogique tant la science y est présente et tant la volonté du réalisateur de « bien faire » est incontestable. Pour son long métrage, Christopher Nolan s'est d'ailleurs attaché les conseils du physicien américain Kip Stephen Thorne, spécialiste de la relativité générale et inventeur du concept de trou de ver.

Dans le film, le professeur Brand, sans doute le reflet de Thorne, tente de bâtir une nouvelle théorie physique capable de rendre compte en même temps de toutes les interactions fondamentales, gravitation et interactions à l'échelle microscopique. Le professeur explique que la mise au point de cette « théorie du tout » pourrait changer le destin de l'humanité en nous rendant capable d'envoyer dans l'espace les énormes vaisseaux à même de sauver l'humanité. Si l'on oublie 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.

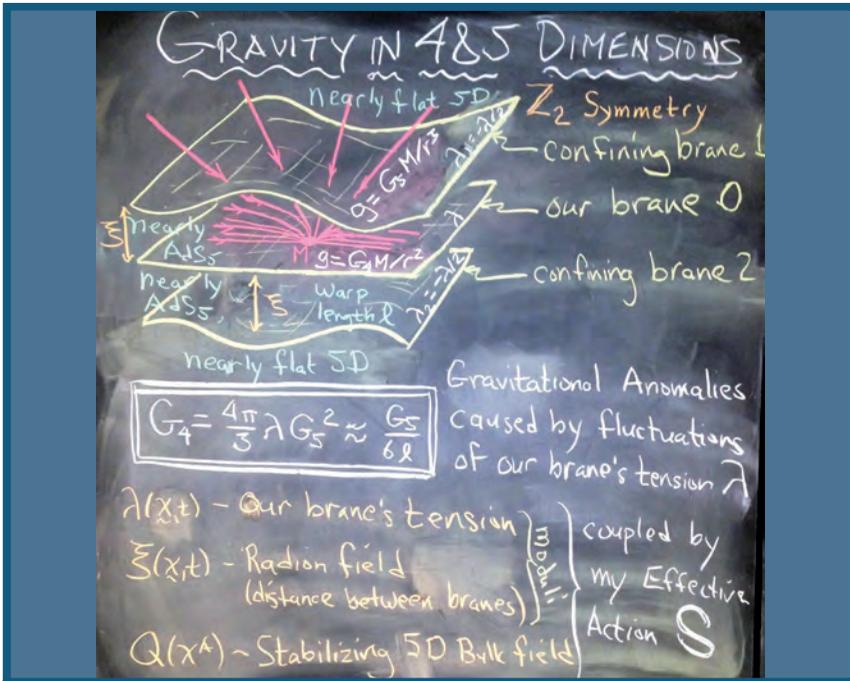


Figure 1 : © Interstellar, Christopher Nolan

Sur le premier tableau (voir ci-dessus), un dessin représente notre univers comme une surface (« *our brane 0* ») prise en sandwich entre deux autres (« *confining brane 1* », « *confining brane 2* ») situées dans une dimension « perpendiculaire » aux deux nôtres. Cela montre clairement que le professeur Brand bâtit sa théorie dans un super-espace – le *bulk* – ayant plus de dimensions que notre univers. 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 plus de dimensions. Ce *bulk* y est décrit par un espace à cinq dimensions dit *anti de Sitter* (noté AdS_5 sur le tableau). La motivation de Randall et Sundrum était d'expliquer la faiblesse de la gravitation vis-à-vis des autres interactions : à l'échelle microscopique, 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 comportant une dimension spatiale supplémentaire et que toutes les interactions, sauf la gravité, restent confinées dans les trois dimensions qui nous sont familières. Pouvant s'exprimer dans toutes les dimensions, la gravité semble être, pour nous, observateurs tridimensionnels, victime de « fuites » qui se traduisent par son apparente faiblesse quand nous l'expérimentons dans les trois dimensions ordinaires.

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

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

Where!

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

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

Figure 2 : © Interstellar; Christopher Nolan

L'intimidante formule du second tableau (ci-dessus) confirme cette interprétation. Elle exprime l'« action effective » de la théorie du professeur Brand. En physique, l'action est une grandeur physique scalaire ayant pour dimension le produit d'une énergie par un temps. Son importance est due à un principe très général appelé *principe de moindre action* : le trajet effectivement suivi par un objet entre deux points donnés est celui qui conduit à un extrémum de l'action. Ainsi, en mécanique, au lieu de

penser la trajectoire comme résultant d'accélération produites par des forces, on l'imagine comme la courbe qui optimise l'action. Ce principe de moindre action s'est avéré 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 où 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 dans un espace à cinq dimensions : une de temps et quatre d'espace. Le problème est qu'il a été montré que le « sandwich AdS₅ » 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 (numérotées de 0, 1 et 2) et un terme associé au *bulk* censé stabiliser l'ensemble.

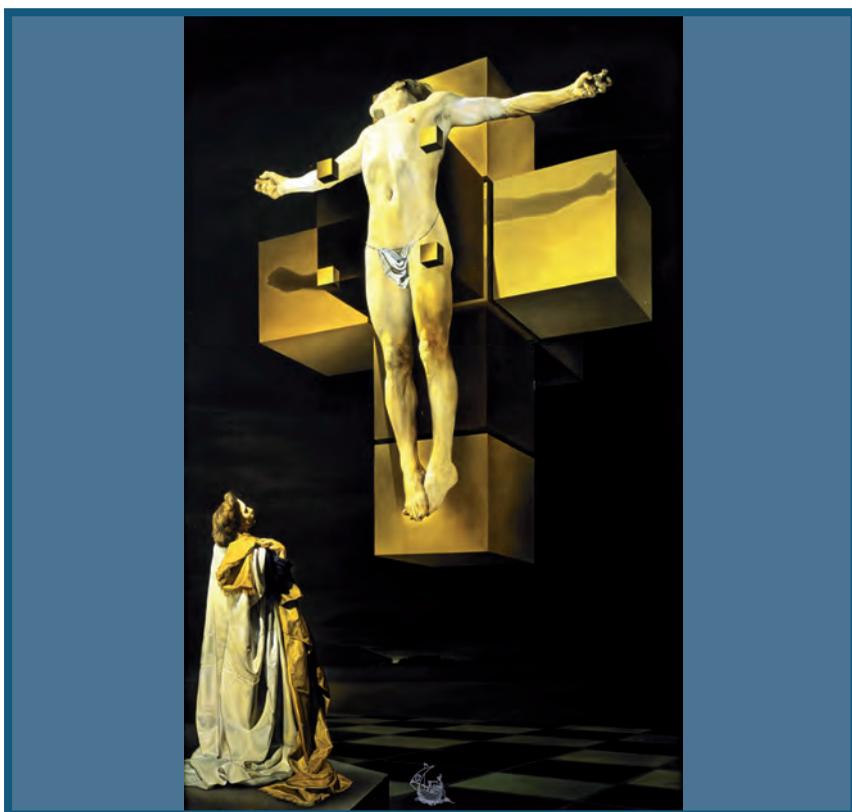
Quand le temps devient une dimension physique

La quête du professeur, l'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique, n'est toujours pas résolue aujourd'hui. Diverses approches du problème, comme la gravité quantique à boucles, la théorie des cordes, la géométrie non-commutative, et bien d'autres, font toujours l'objet d'intenses recherches, notamment en mathématiques.

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 nommé Tesseract. En géométrie, le tesseract est un objet quadridimensionnel qui est au cube ce que le cube est au carré et le carré au segment de droite. 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. Dans le film, cette structure géométrique est en fait un passage qui 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, de là, il devient capable de percevoir le temps comme une dimension physique. C'est pour cela qu'une fois dans le tesseract Cooper voit la chambre de sa fille Murph, la future adjointe du professeur Brand, démultipliée 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.

Un objet géométrique qui n'a pas fini de nous fasciner

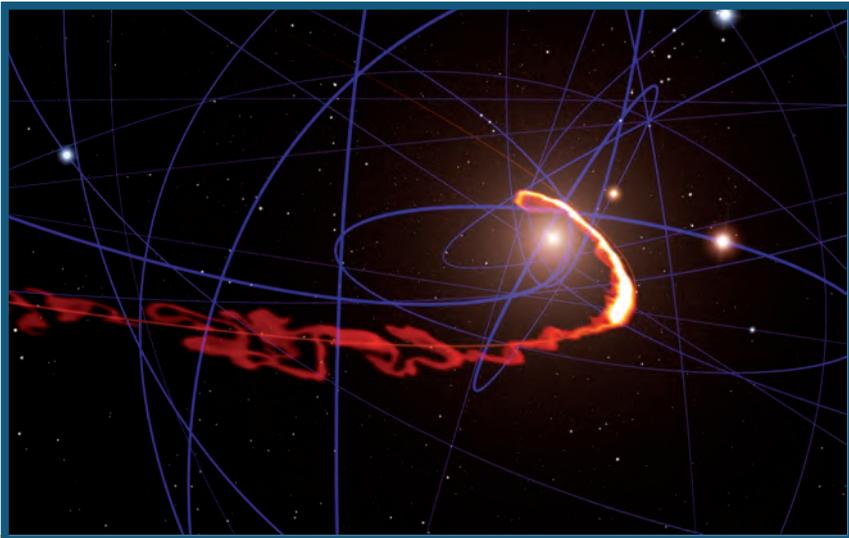
Par ses propriétés troublantes, le tesseract, ou hypercube, apparaît dans bien d'autres œuvres. Ainsi, dans le film *Cube 2 : hypercube* (Andrzej Sekula, 2002), huit personnages sont piégés dans un tesseract qui apparaît comme un réseau de cubes connectés dont certains altèrent le déroulement du temps. Dès 1941 et sa nouvelle *la Maison biscornue* (*Astounding Stories*, 1941), 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 Dieu pourrait exister dans une dimension qui nous est incompréhensible, le tesseract existe dans un espace quadridimensionnel inaccessible à l'esprit humain.



Crucifixion (Corpus Hypercubus).
© Salvador Dalí, Fundació Gala-Salvador Dalí, Figueres, 2014
Photo © 1987 The Metropolitan Museum Of Art

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 tente de marier histoire forte et exactitude scientifique. Mais *Interstellar* reste une œuvre de science-fiction où liberté artistique et extrapolation scientifique font partie du jeu. En invitant les spectateurs à s'interroger sur la nature de l'espace et du temps et sur la façon dont nous les percevons, il a une vertu pédagogique et se situe en plein dans ce qu'en 1909 l'écrivain Maurice Renard nommait « *merveilleux scientifique* », c'est-à-dire « *l'aventure d'une science poussée jusqu'à la merveille ou d'une merveille envisagée scientifiquement* ».

R.L.



Cette simulation d'un nuage de gaz passant à proximité du trou noir supermassif du centre de notre galaxie reproduit l'évènement tel qu'il était au milieu de l'année 2013. Les observations effectuées au moyen du VLT de l'ESO confirment que le nuage est à présent si étiré que sa partie avant a dépassé le point le plus proche de sa trajectoire et s'éloigne du trou noir à plus de 10 millions de km / h, tandis que la partie arrière continue de chuter sur lui.

© ESO/S. Gillessen / MPE / Marc Schartmann