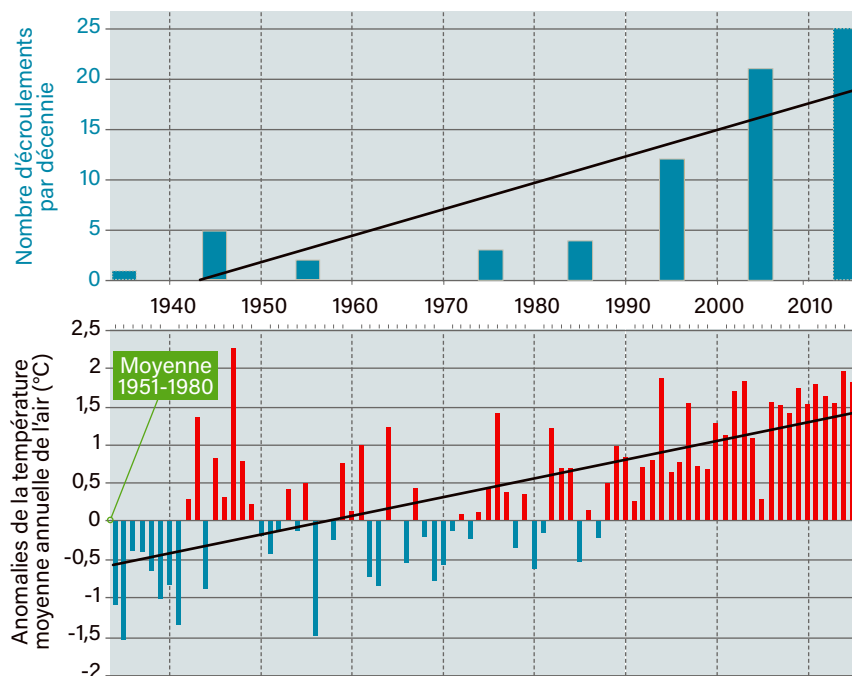




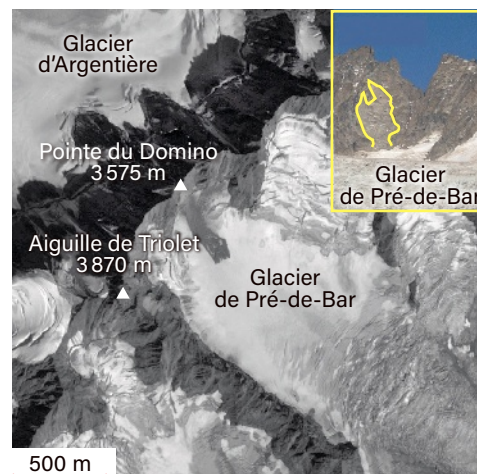
L'évolution du nombre d'éboulements constatés sur la face ouest des Drus et sur le versant nord des aiguilles de Chamonix entre 1930 et 2010, mise en regard des anomalies de la température (par rapport à la moyenne 1951-1980) pendant la même période.

refroidit toutes les parois, quelle que soit leur exposition. L'enneigement influence donc l'épaisseur de la couche active!

Puisque nous connaissons mieux la distribution actuelle du pergélisol alpin, nous avons tenté de modéliser ce que pourrait être sa répartition d'ici à la fin du siècle compte tenu des scénarios climatiques proposés par le Giec en 2013 (ils seront certainement réévalués à la hausse dans le prochain rapport d'août 2021!). Nous avons utilisé pour cela la carte de la température probable à la surface des parois du massif du Mont-Blanc, afin de fixer les conditions initiales de la température de surface; ensuite, nous nous sommes servis d'une équation décrivant la conduction thermique dans la roche et avons pris en considération les processus de gel et de dégel dans les fractures du substrat rocheux afin de modéliser les séries climatiques allant de 1850 (connu) à 2100 (à prédire).

UNE DÉSTABILISATION ÉCLAIRÉE PAR DES MODÉLISATIONS

Quelles conclusions principales ressortent de cet exercice? Pour commencer, le fait que la perturbation thermique induite par le changement climatique depuis la fin du Petit Âge glaciaire (du xiv^e à la fin du xix^e siècle) est, d'après notre modèle, sensible jusqu'à 60-70 mètres de profondeur, d'où la déstabilisation possible de pans entiers de montagne comme au piz Cengalo en 2018; ensuite le fait qu'à la fin du xx^e siècle,



L'éboulement de la pointe du Domino pendant l'été 2003, sur le versant italien du massif du Mont-Blanc, reconnu à partir de son dépôt sur le glacier de Pré-de-Bar, visible sur une image prise par le satellite SPOT-5 le 22 août 2015.

seulement quelques secteurs à pergélisol subsisteront au cœur des sommets évasés au-dessous de 3300 mètres d'altitude avec toutes les modifications de morphologie des montagnes que cela suppose; finalement, selon le scénario le plus pessimiste du Giec (pour le moment!), le pergélisol disparaîtrait au moins jusqu'à 4300 mètres d'altitude dans les faces sud et dans les sommets étroits ayant moins de 3850 mètres d'altitude. Étant donné que le mont Blanc culmine à 4808 mètres, on voit bien que nos montagnes comportent beaucoup de parties hautes susceptibles d'être déstabilisées.

Or, dans les seules Alpes françaises, près d'un millier d'éléments d'infrastructures – refuges, remontées mécaniques, structures associées, etc. – sont implantés sur du pergélisol. Plusieurs d'entre elles ont déjà subi des dommages en contexte de paroi. En août 1998 par exemple, le refuge des Cosmiques, situé à 3613 mètres d'altitude dans le massif du Mont-Blanc, s'est vu déstabilisé après un éboulement rocheux ayant mobilisé 600 mètres cubes directement sous le refuge. Il a donc fallu se livrer à de nombreux travaux de renforcement de son assise.

Compte tenu du degré d'anthropisation élevé de certains massifs de haute montagne – au premier chef les Alpes! – et de l'accélération du changement climatique, l'intensification des recherches sur le pergélisol – indicateur pertinent du réchauffement climatique – est une nécessité. Pas seulement dans massif du Mont-Blanc: tous les massifs de haute montagne du monde connaissent des évolutions comparables. Or, pour le moment, très peu de travaux de recherche sont menés hors des Alpes sur les éboulements de parois. ■

BIBLIOGRAPHIE

P.-A. Duviard *et al.*, **Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps**, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 189, article 103 311, 2021.

J. Mourey *et al.*, **The effects of climate change on high mountain environments - Evolution of mountaineering routes and their conditions of use in the Mont-Blanc massif over half a century**, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, vol. 51(1), pp. 176-189, 2019.

X. Gallach *et al.*, **Timing of rockfalls in the Mont Blanc massif (western Alps). Evidences from surface exposure dating with cosmogenic ¹⁰Be**, *Landslides*, vol. 15, pp. 1991-2000, 2018.

LE TEMPS EXISTE-T-IL ?

- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



<https://boutique.groupepourlascience.fr>

L'ESSENTIEL

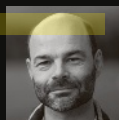
> Les chercheurs ne se limitent pas à étudier des systèmes à trois dimensions : les mathématiciens considèrent des systèmes de dimension n quelconque et certains processus physiques ne se manifestent qu'en deux dimensions.

> De nombreux arguments permettent de dire que le

monde réel a trois dimensions d'espace. Pourtant, la physique théorique suggère parfois d'autres possibilités.

> Ces idées ont inspiré les auteurs de science-fiction, qui aiment jouer avec les repères de leurs lecteurs. Ils ont ainsi vulgarisé des concepts parfois difficiles à se représenter.

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CEA à Saclay



JEAN-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue au
CNRS-MNHN, à Paris

L'Univers, combien de dimensions?

Il semble évident que nous vivons dans un monde à trois dimensions d'espace et une dimension de temps. Pourtant, les auteurs de science-fiction n'hésitent pas à emmener leurs lecteurs dans des univers déroutants où le nombre de dimensions est différent. Ils ne sont pas les seuls : la science conduit souvent les chercheurs sur de tels territoires exotiques.

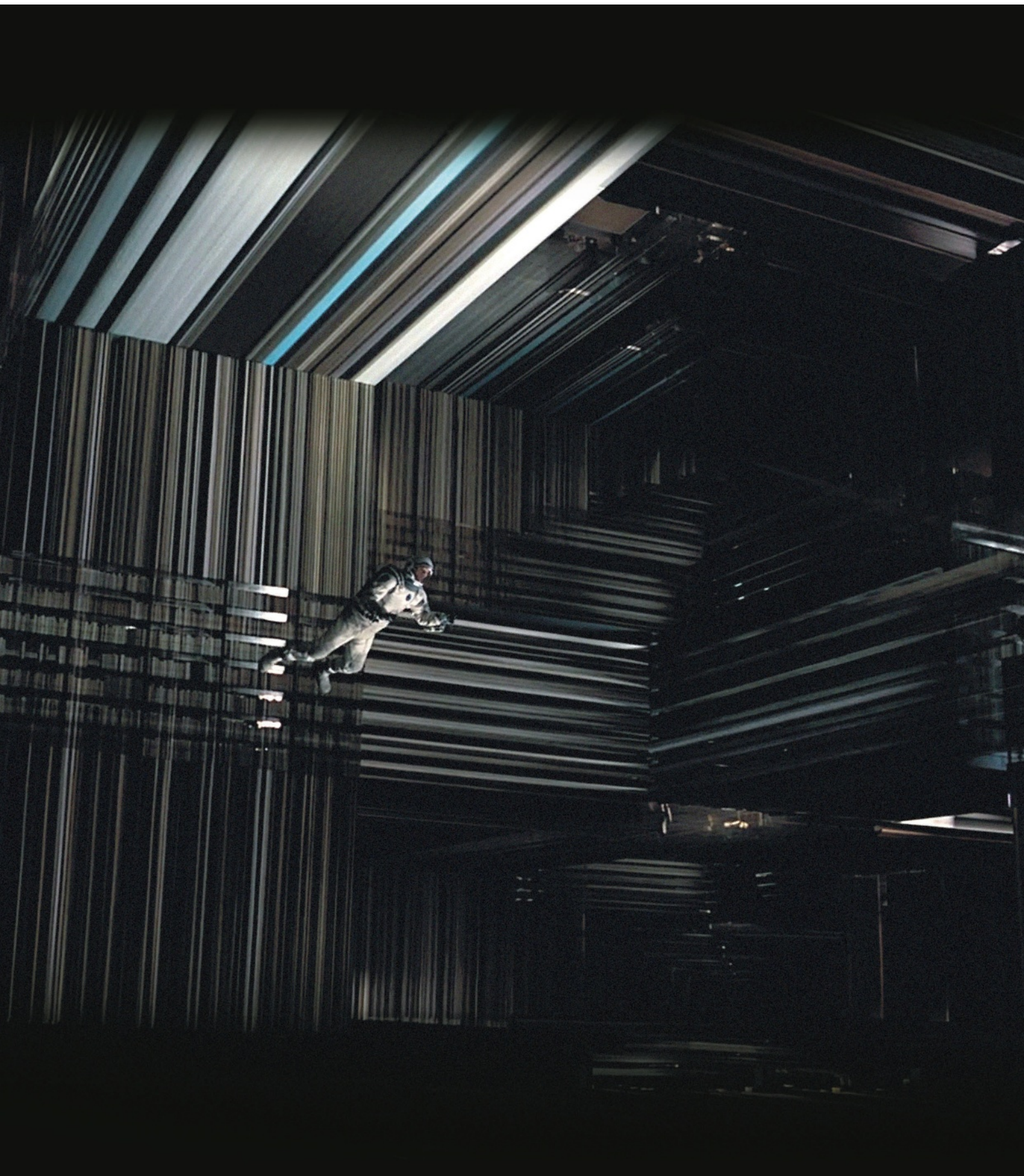
Pour aller à un rendez-vous, rien de plus facile. Nous avons besoin du nom de la rue et d'un numéro (un segment et un point de ce segment) pour nous repérer sur une carte à deux dimensions et d'un étage pour la dimension verticale. Cela suffit-il pour dire que nous vivons bien dans un monde à trois dimensions d'espace? Rien n'est moins sûr...

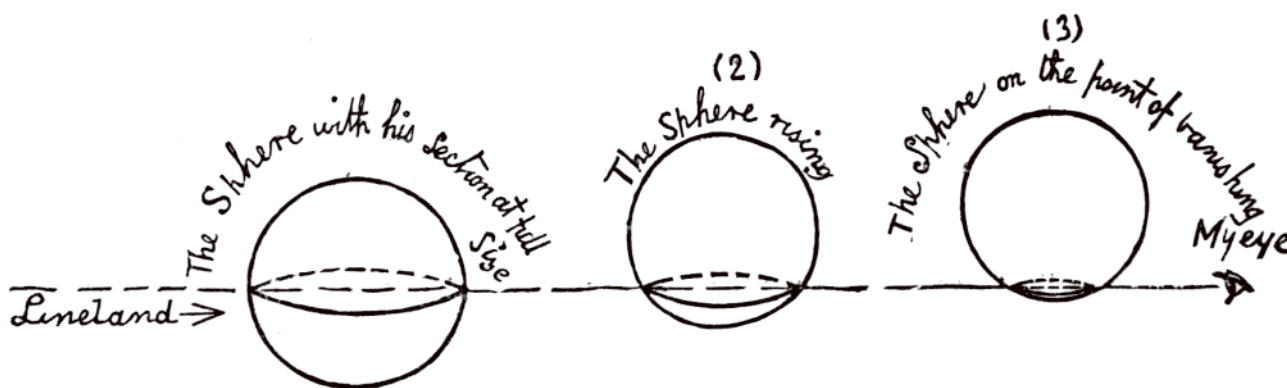
Les mathématiciens, toujours prompts à élargir le cadre de leurs études et à généraliser leurs théorèmes, n'ont pas hésité à envisager des espaces à plus de trois dimensions. Au milieu du XVIII^e siècle, l'idée d'une quatrième

dimension est apparue sous les plumes de Jean Le Rond d'Alembert (qui l'a mentionnée en 1754 dans l'entrée « dimension » de l'*Encyclopédie*) et de Joseph-Louis Lagrange (dans sa *Mécanique analytique*, publiée en 1788). Cette quatrième composante est alors associée au temps (il faut bien convenir d'une heure pour notre rendez-vous!).

Cette avancée conceptuelle a pris toute son importance dans la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein, dont le cadre géométrique est l'espace « inventé » par l'Allemand Hermann Minkowski (1864-1909), un espace non euclidien à quatre dimensions. On parle depuis d'« espace-temps ». Tout aussi

Dans le film *Interstellar*, le héros se retrouve dans un monde à cinq dimensions, qui lui permet de voir un même lieu à différents instants. Le traitement visuel des dimensions supplémentaires est ici assez classique, avec un effet kaléidoscopique et fractal.





Dans cette illustration extraite de *Flatland* (1884), une sphère qui traverse le plan (le monde de Flatland) apparaît comme un cercle qui change progressivement de taille. De la même façon, si elle traverse un monde à une dimension (Lineland), elle apparaît comme un segment dont la longueur varie au cours du temps.

déroutante, dès le XIX^e siècle, la géométrie multidimensionnelle s'est développée, notamment sous l'impulsion du mathématicien allemand Bernhard Riemann, qui a publié en 1854 une thèse intitulée « Sur les hypothèses qui fondent la géométrie ». Les espaces étudiés ont alors un nombre arbitraire de dimensions.

Le mathématicien et philosophe anglais Charles Howard Hinton a été l'un des premiers à vulgariser ces idées nouvelles dans *Qu'est-ce que la quatrième dimension ?* (1880). Il y expliquait notamment la construction d'un hypercube, qu'il a nommé « tesseract », en généralisant la construction du carré par translation d'un segment et celle d'un cube par translation d'un carré. Hinton a aussi forgé les mots *kata* et *ana* (du grec) pour désigner les deux directions opposées d'une quatrième dimension spatiale, analogues à haut-bas, droite-gauche et avant-arrière.

En suivant les mêmes idées, dans son livre *Flatland*, publié en 1884, le théologien anglais Edwin Abbott invitait ses lecteurs à découvrir le mode de vie du peuple de Flatland, pays dont la particularité est d'avoir seulement deux dimensions d'espace. Il y narrait les aventures d'un personnage, nommé Carré, au milieu de ses congénères géométriques plats – triangles, carrés, pentagones et autres hexagones. Vers la fin de l'histoire, Carré rencontre un être jamais vu jusqu'alors : un cercle parfait dont la taille varie ! Il s'agit en fait d'une créature, Sphère, vivant dans l'espace tridimensionnel contenant Flatland. En traversant le plan de ce plat pays, elle se manifeste comme un cercle aux sens de Carré (voir la figure ci-dessus). Sphère fait alors découvrir à Carré les mystères de la troisième dimension et la véritable nature de son univers. Le voyage mental de Carré dans les dimensions supérieures est une sorte de métaphore décrivant l'expérience mystique vécue par l'accès à une réalité supérieure.

À la fin du XIX^e siècle, l'astrophysicien allemand Johann Karl Friedrich Zöllner a repris cette même idée pour expliquer le phénomène des fantômes : il s'agirait de l'intersection temporaire d'un hypothétique être à quatre dimensions spatiales avec notre espace qui n'en a que trois. L'être apparaîtrait à nos sens quand son corps traverse notre univers, puis disparaît ensuite. Connu pour ses travaux sur l'effet Doppler et inventeur d'une illusion visuelle où des lignes semblent non parallèles alors qu'elles le sont bel et bien, Zöllner s'était aussi appliqué à trouver une interprétation scientifique au spiritisme. Il a proposé que la physique d'un espace à quatre dimensions expliquerait certains phénomènes paranormaux et il a tenté de prouver, sans convaincre ses collègues scientifiques, que les esprits sont des êtres à quatre dimensions.

Dans un essai intitulé *The Fourth Dimension: Toward A Geometry of Higher Reality* (1984), le mathématicien américain Rudy Rucker a décrit de façon humoristique quelques prouesses dont seraient capables des êtres quadridimensionnels agissant dans notre monde : s'évader d'une prison ou voler l'intérieur d'un coffre sans en ouvrir la porte. D'ailleurs, dans les œuvres fantastiques, les dimensions supplémentaires sont souvent peuplées de terribles monstres capables de pénétrer et de hanter notre monde, comme dans les œuvres de Howard P. Lovecraft, ou à l'exemple du démogorgon de la série *Stranger Things* (Matt et Ross Duffer, 2016).

LE MONDE DE FLATLAND EST-IL POSSIBLE ?

Dans son roman, Abbott n'a donné aucune précision sur la physique de Flatland ni sur les techniques utilisées par ses habitants. Mais le défi a été relevé par Alexander Dewdney. À la fin des années 1970, cet informaticien canadien a publié plusieurs articles dans lesquels il a posé les bases du planivers, un monde