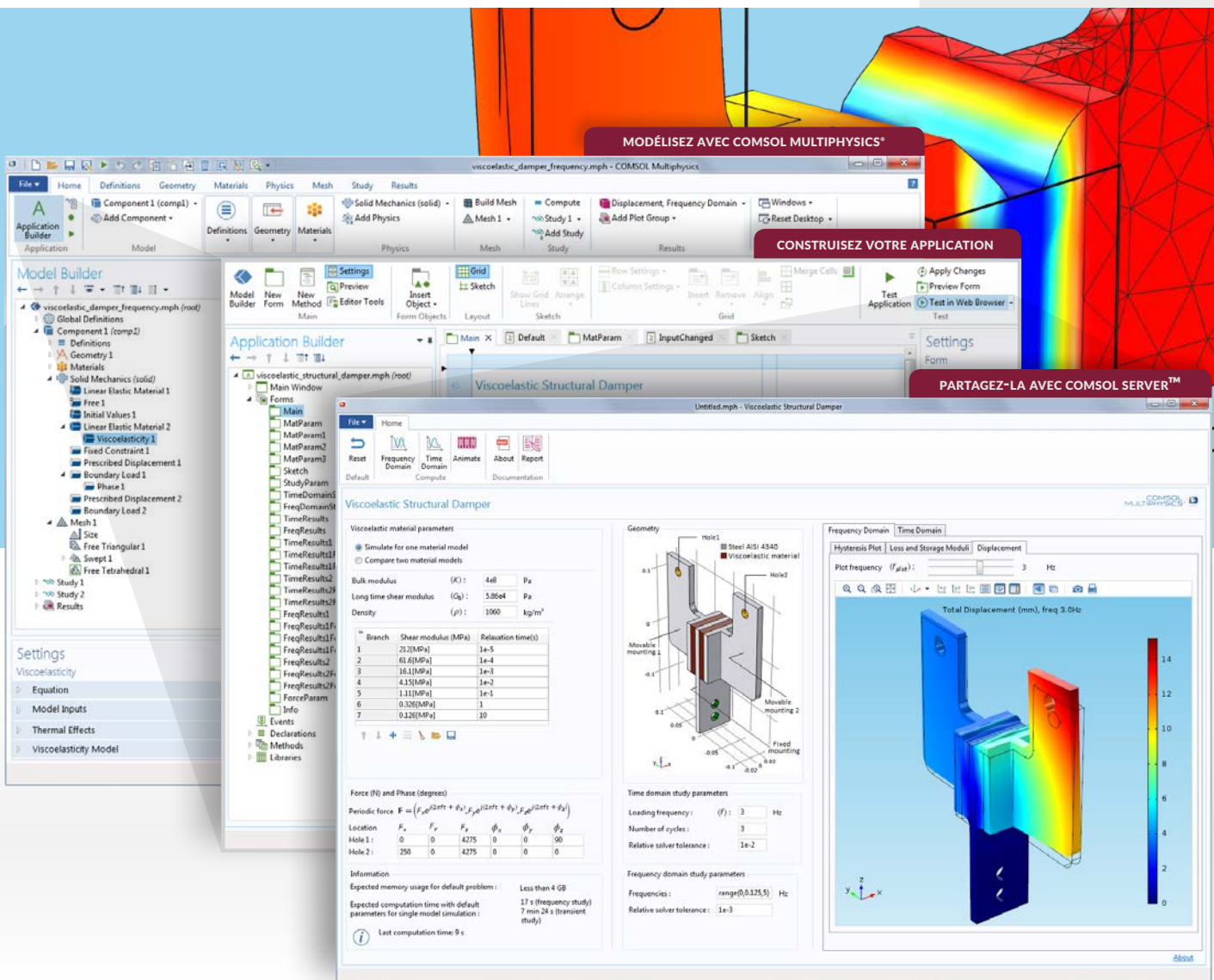




Du Modèle à l'Application, vers le Serveur

PARTAGEZ VOTRE EXPERTISE EN SIMULATION

COMSOL Multiphysics® et son Application Builder fournissent des outils pour concevoir facilement des interfaces personnalisées pour vos applications en multiphysique. Utilisez ensuite COMSOL Server™ pour partager vos applications avec vos collègues et vos clients dans le monde entier.

Pour en savoir plus sur vos applications en simulation, rendez-vous sur **comsol.fr**.

IDÉES DE PHYSIQUE

Comment gagner une course de bobsleigh

La gravité est le principal moteur du bobsleigh, mais le contrôle de la force centrifuge et de la glisse est essentiel pour optimiser les trajectoires.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Une minute de glissade sans aucun freinage sur une piste étroite et verglacée, dont la pente dépasse 8% en moyenne et peut atteindre 15%, avec des vitesses de pointe de 140 kilomètres par heure et des accélérations ressenties allant jusqu'à 5 g (c'est-à-dire 5 fois l'accélération de la pesanteur) dans les virages : l'équipage des bobsleighs, à deux ou à quatre, est soumis à rude épreuve et pratique un sport dangereux ! Et après toutes ces sensations, c'est

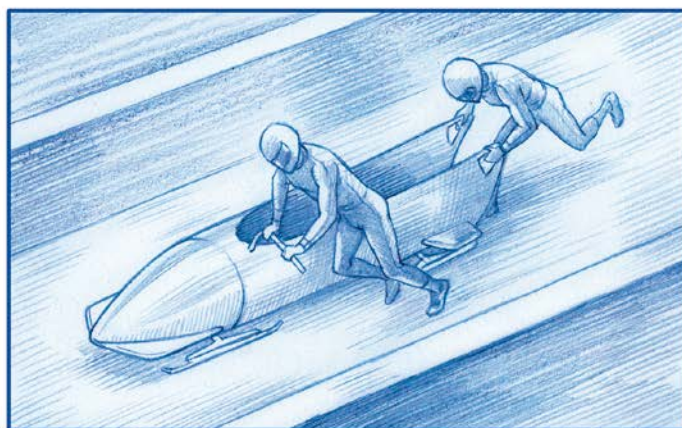
au centième de seconde qu'il faut départager les concurrents...

Les équipages ont peu de marge d'action

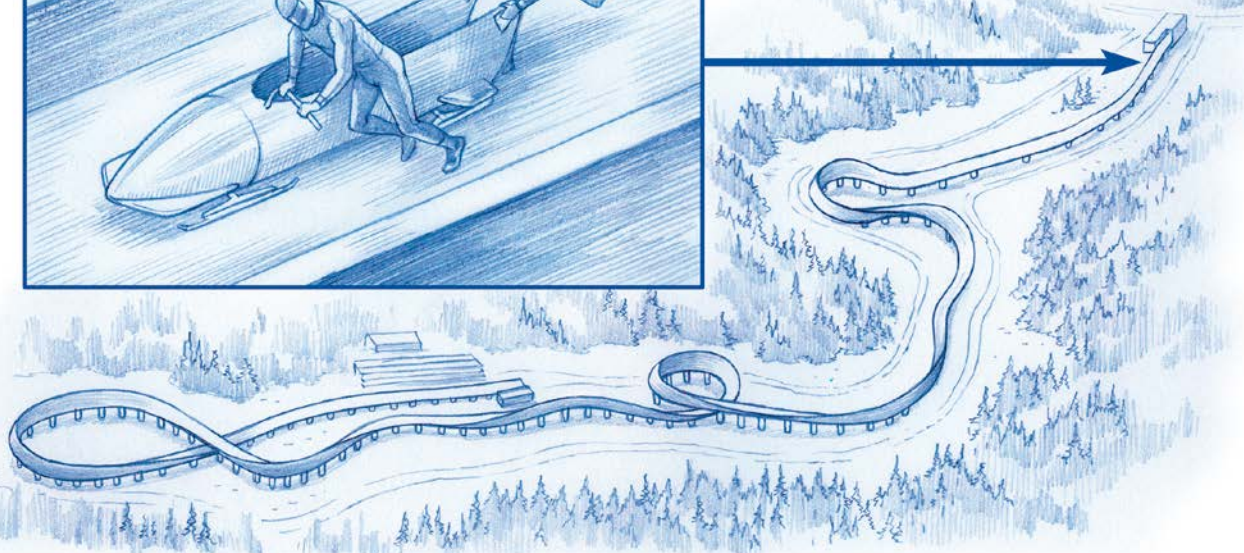
Ainsi, lors des Jeux olympiques de Sotchi en 2014, les 80 temps réalisés par les 20 premières équipes lors des 4 manches de la compétition étaient compris entre 54,82 et 56,25 secondes. Même si ces différences sont infimes, les résultats ne sont pas le

fruit du hasard et les meilleurs équipages ont systématiquement quelques dixièmes de seconde d'avance sur leurs concurrents. Où vont-ils chercher ce minuscule avantage ? La marge d'action est limitée, mais la physique nous fournit des pistes et nous permet de mieux apprécier les performances.

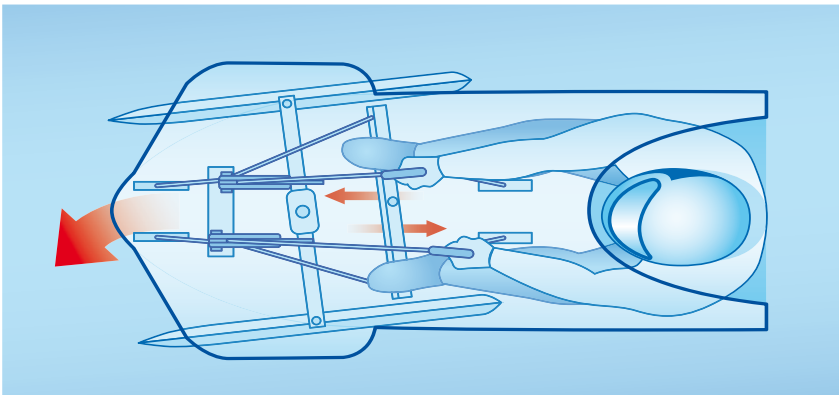
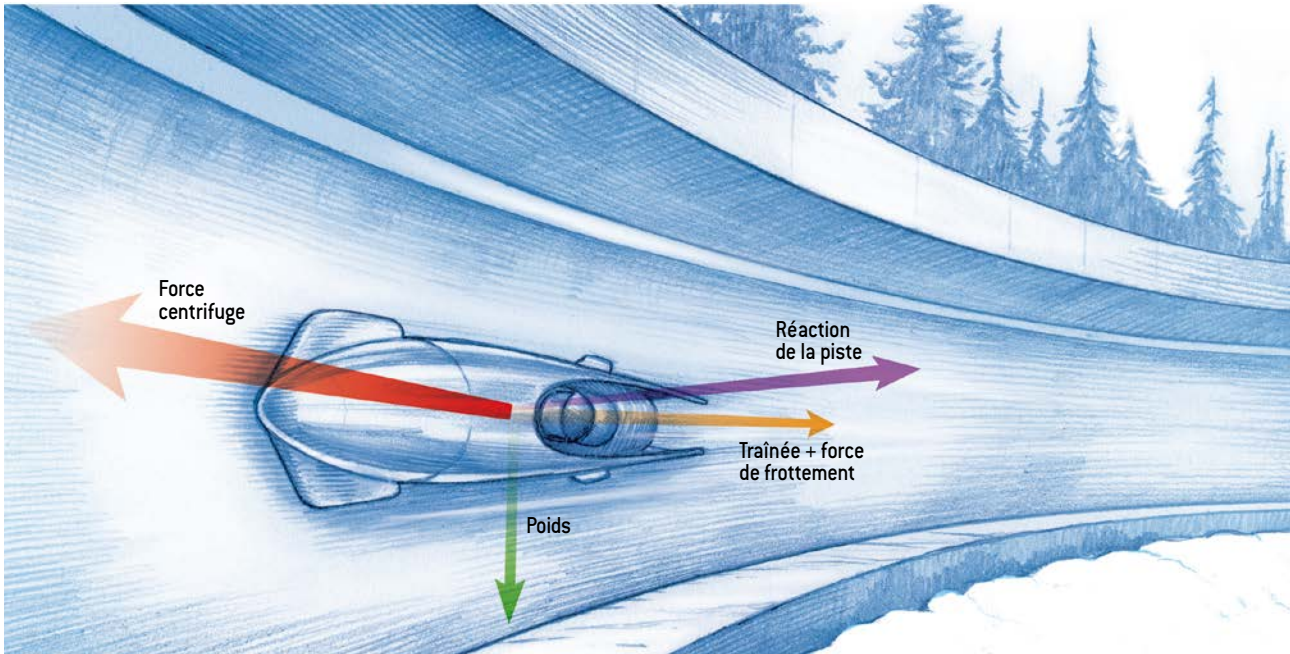
Avant de nous intéresser à la trajectoire et au pilotage du bobsleigh, commençons par la vitesse. Après une poussée initiale sur les 50 premiers mètres de la piste, le seul moteur du bobsleigh est la gravité. En



LA PISTE D'ALTENBERG, en Allemagne, est longue de 1 413 mètres pour un dénivelé de 122 mètres. L'élan est pris par l'équipage en poussant le bobsleigh au début de la piste, dans sa partie rectiligne.



Dessins de Bruno Vacaro



PLUSIEURS FORCES S'EXERCENT sur le bobsleigh, la force motrice étant le poids (*dessin du haut*). Afin que le bolide ne soit pas déporté latéralement, il faut que la somme du poids et de la force centrifuge n'ait pas de composante latéralement à la piste. Pour ce faire, le pilote doit ajuster finement sa trajectoire et sa position sur la piste, donc son inclinaison. Afin de guider l'engin, il dispose de poignées et d'un système de poulies permettant de faire tourner les patins avant (*schéma ci-dessus*).

négligeant les frottements des patins sur la glace et la traînée aérodynamique, le gain d'énergie cinétique lors de la descente est égal à la perte d'énergie potentielle de pesanteur. Si la vitesse initiale est nulle, la vitesse atteinte ne dépend alors ni de la masse de l'engin ni de la longueur parcourue, mais uniquement du dénivelé depuis le point de départ.

Prenons le cas du circuit d'Altenberg, en Allemagne (*voir la figure page précédente*). La longueur de la piste est de 1 413 mètres pour un dénivelé de 122 mètres. On prévoit donc que le bob dépasse à l'arrivée les 175 kilomètres par heure (km/h). C'est plus que les maximums de 140 à 150 km/h

mesurés ; cela signifie que les frottements jouent un rôle.

Cette première estimation nous permet aussi de comprendre pourquoi un bon départ est crucial. Le bob part à l'arrêt et les membres de son équipage commencent par le pousser dans une partie de piste de faible pente, puis embarquent l'un après l'autre avant que le bob ne soit trop rapide : la vitesse est alors proche de 40 km/h. S'affiche alors un temps intermédiaire, 50 mètres après la ligne de déclenchement du chronomètre, qui donne une indication sur la qualité du départ. Avoir le meilleur temps de départ signifie d'une part avoir une avance sur le temps final, d'autre part une vitesse plus élevée que les autres à l'issue de ces 50 mètres.

Limiter la traînée

À cause des faibles frottements, cet avantage en vitesse sera conservé tout au long du parcours et amplifiera même modestement l'avance initiale. Imaginons ainsi un temps de départ plus court de 0,1 seconde qu'un temps typique de 5 secondes mis pour atteindre au bout de 50 mètres une vitesse de 11 mètres par seconde (m/s). On calcule que le gain de vitesse serait de l'ordre de 0,22 m/s, ce qui se traduirait, si la piste d'Altenberg avait

une pente constante, par un gain supplémentaire de 0,25 seconde. D'où l'intérêt d'avoir un équipage puissant et coordonné !

Quant aux frottements, il y a d'abord celui de la glace sur les patins. Aujourd'hui, le règlement impose un même acier pour tous les concurrents. Le choix du profil des patins, en fonction de la piste et de la glace, est la seule marge de manœuvre. Il y a ensuite les forces de frottements aérodynamiques, c'est-à-dire la traînée. Dans ces régimes d'écoulement d'air, elle croît comme le carré de la vitesse et fait intervenir le maître-couple (l'aire de la section présentée par le bob et son équipage à l'écoulement) et un coefficient d'aérodynamisme. Or en dehors du pilote, les coéquipiers sont tête baissée dans le bob : on s'attend donc à très peu de différence dans ces quantités en fonction du gabarit de l'équipage.

Si la traînée est à peu près la même, la décélération associée est, elle, inversement proportionnelle à la masse. Plus l'équipage est lourd, moins elle sera élevée et meilleur sera le temps de parcours. C'est pourquoi, depuis 1952, la masse totale du bobsleigh et de son équipage est limitée selon les catégories. Ainsi, à Altenberg, le record est de 54,64 secondes pour le bob masculin à deux, limité à 390 kilogrammes, tandis qu'il est de 56,79 secondes pour le bob féminin à deux, limité à 340 kilogrammes.

En pratique, on s'appuie sur des mesures expérimentales pour évaluer ces forces de frottement et tenter d'améliorer les performances du bobsleigh. Typiquement, les décélérations de glissement sont inférieures à 0,005 g et les décélérations aérodynamiques sont de 0,03 g à plus de 30 m/s, sachant que l'accélération moyenne le long de la piste d'Altenberg est d'environ 0,086 g. L'optimisation aérodynamique est donc essentielle pour améliorer les performances.

Cependant, la vitesse n'est pas tout. S'il sait jouer avec le faible frottement sur la glace, le pilote a un rôle crucial, tant pour éviter l'accident que pour améliorer le temps. Les pistes de bobsleigh comportent de nombreux virages qui s'enchaînent. Avec des vitesses de 30 m/s et des rayons de courbure aussi petits que 20 mètres, on a des accélérations latérales de l'ordre de

4,5 g. Le frottement latéral d'un patin sur la glace ne peut exercer de force suffisante pour les compenser. Aussi la piste est-elle en forme de tube dans les virages, afin que le bob puisse s'incliner en remontant la paroi, de façon que la somme de son poids et de la force centrifuge soit perpendiculaire à la piste (et compensée par la réaction de la piste sur le mobile).

Un pilotage de précision

Pour une accélération de 4,5 g, il faut que le bob s'incline de 77 degrés par rapport à l'horizontale afin qu'il y ait compensation des forces latérales. Le pilote doit ainsi s'assurer que la hauteur du bob dans le virage, et donc son inclinaison, est celle qui permet d'éviter tout dérapage. S'il ne maîtrise pas cette montée, l'engin peut dépasser cette ligne d'équilibre, monter trop haut là où le poids l'emporte, au pire se renverser ou au mieux redescendre ensuite sous la ligne pour être repoussé par la force centrifuge, etc. Ces oscillations ne lui font pas seulement perdre un temps précieux. Elles se révèlent catastrophiques lorsqu'il retrouve une portion droite : le bob risque de cogner sur le bord de la piste, s'y frotter et perdre de la vitesse.

Le pilote doit s'assurer que la hauteur du bobsleigh dans le virage permet d'éviter tout dérapage

Notons que suivre la ligne d'équilibre des forces n'a pas que des avantages : cette ligne oblige à remonter en altitude, donc à perdre de la vitesse, et elle augmente par ailleurs la distance parcourue par rapport à une trajectoire plus basse. C'est pourquoi certains pilotes audacieux tentent de mordre la glace en prenant le virage plus serré : ils ralentissent plus, mais parcourent une distance plus courte dans la courbe. Des effets certes infimes, mais parfois décisifs : à Sotchi, après quatre manches, seuls 9 centièmes de seconde séparaient le premier du second.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

L. Poirier, *Ice friction in the sport of bobsleigh*, thèse de doctorat, université de Calgary, 2011 (<http://bit.ly/1mgmP1F>).

O. Lewis, *Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh*, mémoire de Master de science, université technologique de Delft, 2006 (<http://bit.ly/1SaYhng>).



Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr

QUESTION AUX EXPERTS

Les variations de l'activité du Soleil influent-elles sur le climat ?

Oui, mais ces variations sont trop faibles pour expliquer le réchauffement actuel.

Thierry DUDOK DE WIT



Le Soleil est le principal moteur de notre climat : s'il s'éteignait brusquement, la température sur Terre s'effondrerait et la vie disparaîtrait presque totalement en quelques semaines. Les fluctuations de ce moteur expliqueraient-elles le réchauffement climatique constaté depuis les années 1950 ?

Pour le déterminer, on mesure l'activité solaire et les différents paramètres atmosphériques grâce à des instruments installés au sol ou sur des satellites, mais aussi grâce à des indices indirects. Ainsi, les variations de l'activité solaire modulent la production (globalement faible) d'éléments radioactifs dans l'atmosphère. Ces éléments se retrouvent piégés dans le bois ou les glaces polaires, ce qui permet de reconstituer le passé solaire sur plus de 11 000 ans. Depuis quelques décennies, on utilise aussi des modèles numériques pour mieux comprendre la physique à l'œuvre.

Autrefois considéré comme un modèle de constance, le Soleil s'est révélé un peu plus variable qu'on ne le pensait. La puissance du rayonnement reçue par la Terre varie selon des cycles de 11 ans, mais seulement de 0,1 %. Entre le milieu du XVIII^e siècle et le début du XXI^e, une augmentation de l'activité solaire moyenne s'est superposée à ces cycles. Cependant, son amplitude n'est aussi que de l'ordre de 0,1 %. Trop peu pour changer le climat ?

Pas si vite : ne s'intéresser qu'à cette valeur, ce serait comme décrire la richesse d'un pays par son seul PIB. En effet, l'influence du Soleil sur le climat ne dépend pas uniquement

de la quantité d'énergie reçue, mais aussi de multiples autres paramètres.

Parmi eux, le type de fréquences composant le rayonnement solaire. Si la lumière visible et infrarouge, qui représente plus de 92 % de la puissance émise, varie peu, la composante ultraviolette est plus versatile. Or son influence est amplifiée par divers phénomènes, telle son absorption par la haute atmosphère, qui se réchauffe. *In fine*, cela modifie la circulation des masses d'air puis le climat, mais l'effet est surtout local. La température globale ne varie que faiblement.

On a aussi soupçonné une influence du vent solaire, un flux de protons et d'électrons émis en permanence par notre étoile, car les variations de ce flux perturbent l'atmosphère via de nombreux mécanismes. Mais là encore, cet effet est trop faible pour expliquer le réchauffement.

La fausse piste du rayonnement cosmique

Enfin, le champ magnétique du Soleil dévie une partie du rayonnement cosmique (un flux de particules chargées issues des confins de l'Univers), modulant ainsi son intensité sur la Terre. Ce phénomène a été très médiatisé, notamment parce que les climatosceptiques l'ont invoqué pour expliquer le réchauffement. Ils s'appuient sur un mécanisme proposé en 1997 par les physiciens danois Henrik Svensmark et Eigil Friis-Christensen : l'interaction du rayonnement cosmique et de

l'atmosphère produirait à basse altitude des ions favorisant la condensation de gouttelettes d'eau et amorçant la création de nuages. L'activité du Soleil ayant légèrement augmenté lors des dernières décennies, il dévierait une plus grande partie du rayonnement cosmique, ce qui réduirait la couverture nuageuse et favoriserait le réchauffement.

Pour tester cette hypothèse, le Cern a récemment monté l'expérience *Cloud*, qui vise à étudier en laboratoire l'impact du rayonnement cosmique sur la condensation. Les analyses ont confirmé cet impact, mais montré qu'il joue peu sur le climat. Bien trop peu pour expliquer le réchauffement actuel. En outre, l'activité solaire diminue depuis 2009, tandis que le réchauffement, lui, se poursuit.

Les interactions du Soleil et du climat sont, ainsi, extrêmement complexes. Si la haute atmosphère terrestre réagit fortement à l'activité solaire, les plus basses couches (qui sont au cœur de la question du réchauffement climatique) y sont nettement moins sensibles. Selon le dernier rapport du Giec, la part du Soleil dans le réchauffement observé depuis les années 1950 n'est que d'environ 3 %. Ni les modèles ni les observations ne lui attribuent un impact climatique majeur : celui des gaz à effet de serre reste, et de loin, la cause première du réchauffement actuel. ■

Thierry DUDOK DE WIT est professeur à l'université d'Orléans, où il est chercheur au Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace.