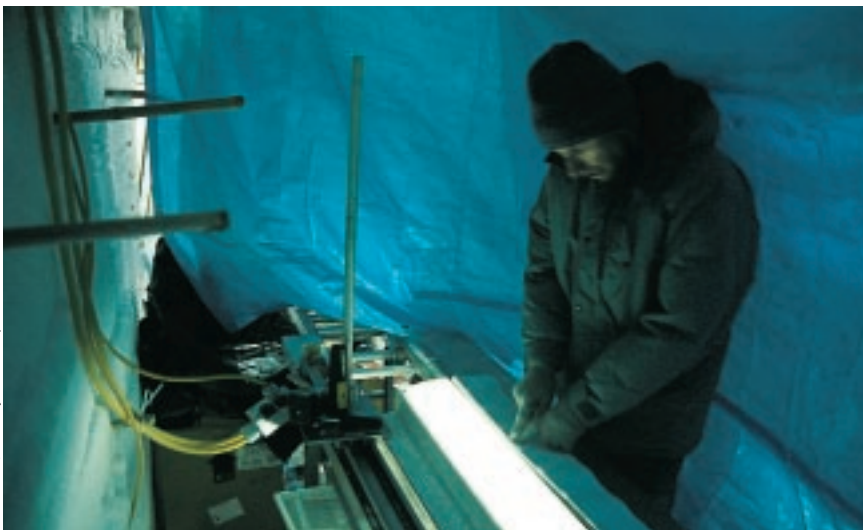




3. LES CAROTTES DE GLACE prélevées au Groenland sont aujourd'hui comparées à celles qui sont récupérées en Antarctique. Les glaciologues examinent quelle est la relation entre les climats des hémisphères Nord et Sud.

entourées d'énormes étendues d'océans gelés, réfléchissaient beaucoup de lumière solaire vers l'espace ; hors des périodes chaudes, au contraire, la fonte des calottes glaciaires permettait une plus grande absorption de la lumière solaire ; l'accumulation de dioxyde de carbone, ainsi que des autres gaz à effet de serre, tels le méthane et la vapeur d'eau, retenait davantage la chaleur.

Comme ces phénomènes réchauffent et refroidissent simultanément les régions de la planète, les climatologues furent surpris lorsque Thomas Stocker, de l'Université de Berne, et Thomas Crowley, de l'Université du Texas, ont annoncé, en 1992, que les événements Dansgaard / Oeschger devaient être inversés au Groenland et en Antarctique.

T. Stocker et T. Crowley avaient observé que, dans l'hémisphère Nord, des eaux salées et tièdes forment le Gulf Stream, de l'Équateur vers l'Arctique, où elles libèrent de la chaleur dans l'atmosphère, créant le climat tempéré et stable de l'Europe du Nord. En se refroidissant, les eaux deviennent plus denses et plongent dans les profondeurs de l'océan, où elles s'écoulent vers l'Antarctique, comme un grand « tapis roulant ». Au plus fort des glaciations, ce tapis roulant ne fonctionnait pas ou était affaibli : les eaux équatoriales s'écoulaient plus lentement vers l'Arctique ; le Groenland et le Nord de l'Europe étaient plus froids. Pendant les événements Dansgaard / Oeschger, le tapis roulant reprenait de la vigueur.

T. Stocker et T. Crowley ont observé que ce système océanique refroidit l'hé-

misphère Sud en même temps qu'il réchauffe le Nord et *vice versa*, à cause de deux phénomènes. Tout d'abord, l'écoulement des eaux profondes et froides vers l'Antarctique engendre un courant de retour vers le Nord : des eaux plus chaudes, peu profondes, ramènent une chaleur supplémentaire qu'elles ont prélevée au Sud. Deuxièmement, le ralentissement du tapis roulant pendant les périodes froides empêche les eaux chaudes originaires des latitudes tropicales de se refroidir beaucoup dans l'hémisphère Nord : il laisse remonter plus d'eau chaude autour de l'Antarctique, ce qui réchauffe l'air de l'extrême Sud.

Cette théorie du déphasage des fluctuations climatiques a été confirmée au milieu des années 1990, lorsque des paléontologues qui étudiaient les foraminifères fossiles (des coquillages microscopiques dont la forme dépend

de la température et de la profondeur) ont constaté que l'océan Antarctique était plus chaud lorsque le tapis roulant ne fonctionnait pas. En outre, Wallace Broecker, de l'Université Columbia, a réexaminé les enregistrements climatiques provenant de carottes sédimentaires et glaciaires de la fin de la dernière glaciation, il y a 20 000 à 10 000 ans : le réchauffement était plus lent en Antarctique pendant les périodes de réchauffement rapide au Groenland, et réciproquement.

Les principaux événements Dansgaard / Oeschger enregistrés dans les carottes de glace du Groenland sont aussi présents en Antarctique, bien que les changements climatiques dans le Sud n'aient pas été aussi importants ni soudains. Des incertitudes quant à la datation des carottes de glace compliquent les corrélations entre les refroidissements au Groenland et les réchauffements en Antarctique pour tous ces événements. Des laboratoires à Grenoble, à Berne et ailleurs tentent de les étendre jusqu'au milieu de la dernière glaciation. Ils pourront, dans les prochaines années, utiliser les nouvelles carottes extraites par les projets de forage profond conduits en Antarctique par des équipes américaines, japonaises, américaines et australiennes.

En forant encore plus profondément dans les calottes glaciaires des deux hémisphères, nous obtiendrons des informations sur les évolutions du climat dans des périodes plus reculées. Nous comprendrons alors mieux les couplages entre l'océan et l'atmosphère qui interviennent fortement dans ces évolutions et nous espérons prévoir les conséquences des activités humaines à moyen terme sur le réchauffement ou sur le refroidissement de la planète.

Richard ALLEY est professeur de sciences de la Terre à l'Université de Pennsylvanie. Michael BENDER est professeur de sciences de la Terre à l'Université Princeton.

R.B. ALLEY et al., *Abrupt Increase in Greenland Snow Accumulation at the End of the Younger Dryas Event*, in *Nature*, vol. 362, pp. 527-529, 8 avril 1993.

W. DANSGAARD et al., *Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-kyr Ice-Core Record*, in *Nature*, vol. 364, pp. 218-220, 15 juillet 1993.

Michael BENDER, Todd SOWERS, Mary-Lynn DICKSON, Joseph ORCHARD, Pieter GROOTES, Paul A. MAYEWSKI et

Debra A. MEESE, *Climate Correlations between Greenland and Antarctica during the Past 100,000 Years*, in *Nature*, vol. 372, pp. 663-666, 15 décembre 1994.

Kurt M. CUFFEY, Gary D. CLOW, Richard B. ALLEY, Minze STUIVER, Edwin D. WADDINGTON et Richard W. SALTUS, *Large Arctic Temperature Change at the Wisconsin-Holocene Glacial Transition*, in *Science*, vol. 270, pp. 455-458, 20 octobre 1995.

Wallace BROECKER, *L'origine des glaciations*, in *Pour la Science*, janvier 1996.

Claude BOUTRON, *La mémoire des glaces du Groenland*, in *Pour la Science*, octobre 1996.

Le bruit en $1/f$

EDOARDO MILOTTI

L'origine de ce signal aléatoire, particulièrement intéressant par le nombre de processus physiques où il intervient, reste partiellement énigmatique. On sait cependant en établir certains modèles généraux.

Allumons la radio et sélectionnons une bande où peu de stations transmettent (par exemple, la région des grandes ondes). Changeons lentement la fréquence d'accord de la radio : entre deux stations radiophoniques perceptibles, les signaux sont très faibles et difficilement audibles. Pour d'autres fréquences, nous n'entendons qu'un bruissement : ce signal est appelé «bruit». Notre oreille capte alors la traduction sonore d'un signal électrique que les circuits de la radio envoient au haut-parleur.

Un signal de bruit, aussi désordonné qu'il est possible, présente pourtant des caractéristiques spécifiques. Quand l'amplitude du signal est répartie autour d'une valeur moyenne selon une distribution de probabilité gaussienne, un tel bruit est dénommé bruit blanc gaussien.

Revenons à notre radio : nous continuons à écouter le bruit et agissons sur le bouton qui règle l'intensité des graves et des aigus ; le son est un bruissement uniforme, mais varie néanmoins selon le réglage.

Comme n'importe quel signal, le bruit peut être décomposé en composantes sinusoïdales de fréquences différentes ; le réglage des graves et des aigus filtre ces composantes. Par exemple, lorsque nous augmentons les graves, les composantes du signal qui oscillent à fréquence élevée sont atténuées. La décomposition d'un signal en composantes sinusoïdales a été analysée par le mathématicien Fourier (voir l'article sur Jean-Baptiste Fourier dans *Les mathématiciens*, Bibliothèque Pour la Science).

Grâce à cette décomposition, on sait caractériser le «bruit blanc» : toutes les fréquences y sont présentes avec la même amplitude ; tout comme,

dans la lumière blanche, toutes les couleurs sont représentées avec une intensité égale.

Lorsque nous filtrons le bruit blanc, nous obtenons évidemment un bruit différent qui est dénommé «coloré». Un bruit de type gaussien est caractérisé par sa densité spectrale, une fonction qui exprime la répartition de la puissance du signal entre les différentes fréquences. La densité spectrale du bruit blanc est constante, tandis que le spectre du bruit blanc filtré décroît avec la fréquence.

Nombre de phénomènes physiques engendrent du bruit, et un grand nombre d'entre eux produisent un bruit (à peu près) blanc, quelques-uns des bruits colorés. Un bruit coloré particulièrement important est le bruit «en $1/f$ ». Dans ce bruit, la puissance associée à une composante de Fourier de fréquence f est inversement proportionnelle à f , et la densité spectrale présente un aspect particulièrement simple lorsqu'elle est représentée sur un graphique avec une échelle doublement logarithmique : la densité spectrale en fonction de la fréquence est une droite de pente -1 .

Dans d'autres bruits colorés similaires au bruit en $1/f$, dénommés bruits de scintillation, la puissance associée à une composante de Fourier de fréquence f est inversement proportionnelle à f^a (a étant compris entre 0,5 et 1,5). Comme dans le cas du bruit en $1/f$, la densité spectrale, lorsqu'elle est représentée sur une échelle doublement logarithmique, est une droite, mais la pente est égale à $-a$.

La première observation sur le bruit en $1/f$ remonte à 1925 : le physicien J. Johnson découvrit son existence en étudiant les fluctuations de

courant dans l'émission thermionique des tubes à vide. En 1926, W. Schottky essaya de l'interpréter théoriquement et, en 1936, C. Christenson et G. Pearson l'ont observé dans des microphones et dans des résistances au carbone. Un circuit où l'on mesure le bruit en $1/f$ est le circuit illustré sur la partie droite de la figure 5 : on observe une telle fluctuation de tension aux extrémités de l'une des deux résistances (c'est aussi une fluctuation de courant ou une fluctuation de la résistance R_c). Au cours d'expériences menées avec des résistances à film mince, le bruit mesuré est presque exactement un bruit en $1/f$, et ce, sur au moins six ordres de grandeur (voir la figure 3).

Ce type de comportement est quasi indépendant du matériau utilisé et, en fait, dépend surtout de l'épaisseur de la résistance (plus celle-ci est mince, plus le bruit en $1/f$ est caractérisé).

L'universalité du bruit en $1/f$

L'une des caractéristiques les plus étonnantes du bruit en $1/f$ est son universalité : il survient dans des dispositifs d'une extraordinaire variété. Ce fait fut mis en lumière par Benoît Mandelbrot au cours des années 1970, dans le cadre de ses travaux sur les fractales. La liste, toujours incomplète, des phénomènes où apparaît un bruit en $1/f$ inclut les fluctuations de résistance des semi-conducteurs, le battement cardiaque, les courants dans les fibres nerveuses, le taux d'insuline dans le sang d'un diabétique, l'intensité des courants océaniques, le bruit sismique, les oscillations de l'axe terrestre, l'activité solaire (voir la figure 1 ci-contre), le débit du Nil au cours des 2 000 dernières

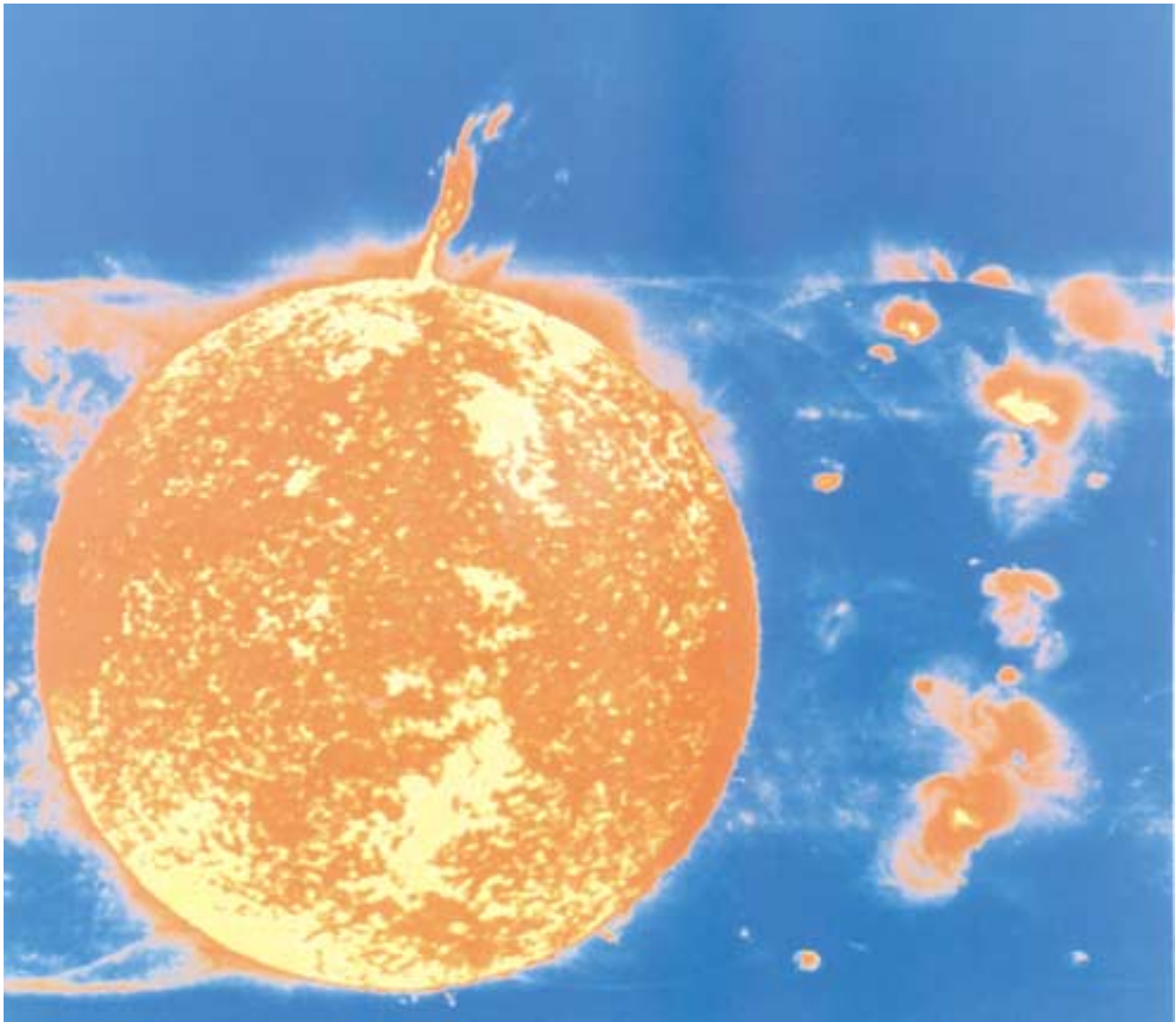
années, la lumière émise par les naines blanches, l'écoulement du sable dans un sablier, l'intensité des fluctuations du trafic routier, le courant dans les solutions ioniques, les jonctions Josephson et la lumière émise par les quasars.

Ces dernières années, la liste des phénomènes s'est enrichie de nom-

breux processus non linéaires. En outre, R. Voss et J. Clarke ont démontré que le son et la voix transmis par la radio ont également un spectre en $1/f$.

Les physiciens ont mis au point de nombreux modèles physiques pour expliquer l'apparition du bruit $1/f$, particulièrement dans les résistances et les semi-conducteurs. Il s'agit

principalement de modèles spécialisés, qui n'expliquent pas pourquoi le bruit $1/f$ apparaît dans de si nombreux processus différents. S'il existe une explication de cette universalité apparente du bruit $1/f$, celle-ci doit tenir compte de nombreuses autres observations expérimentales dont nous allons établir la liste.



1. LE NOMBRE DES TACHES SOLAIRES varie avec une période d'environ onze ans. Pour mesurer l'activité solaire, on utilise le nombre de Wolf : M est le nombre de taches solaires réunies en G groupes de taches, visibles à un instant donné, alors le nombre de Wolf est égal à $R = 10 G + M$. L'illustration de droite représente la densité spectrale du nombre de Wolf mesurée entre janvier 1953 et août 1995. Le segment bleu représente un spectre en $1/f$: le nombre de Wolf présente un spectre proche de $1/f$. Les oscillations rapides visibles surtout aux fréquences élevées sont dues aux fluctuations statistiques, tandis que le pic visible aux basses fréquences correspond à la périodicité de 11 années. La photographie, prise avec le spectroscopie installé à bord du satellite *Skylab*, représente la lumière émise par la surface du Soleil.

