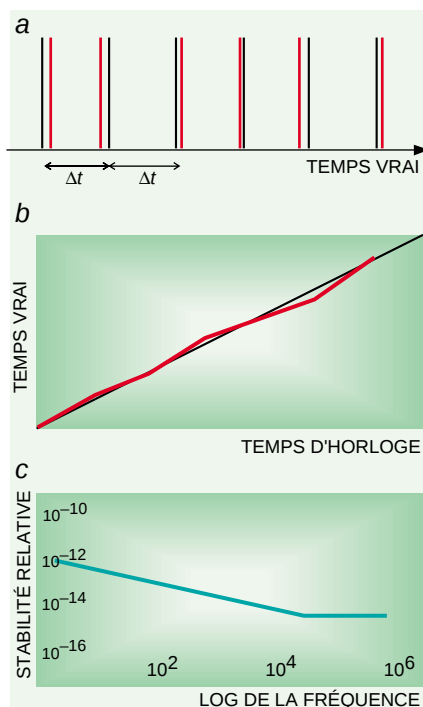




**6. UNE HORLOGE EXACTE** donne des impulsions à intervalles réguliers, comme ceux indiqués en noir (a). Les horloges réelles sont perturbées par des signaux de bruit et donnent des impulsions à intervalles irréguliers, comme indiqué en rouge. La courbe en rouge (b) compare le temps que nous mesurons avec une horloge réelle et le temps réel. Quand le bruit qui perturbe l'horloge est un bruit blanc, la courbe oscille rapidement autour de la droite ; si notre mesure dure suffisamment longtemps, ces oscillations rapides s'annulent : l'erreur relative sur le temps mesuré devient toujours plus petite. Si, toutefois, le bruit est de type  $1/f$ , l'allongement de la durée de la mesure introduit alors une quantité de bruit toujours plus importante : les deux effets se compensent, et donc une extension de la durée de la mesure n'implique aucun accroissement de la précision. Cet effet est illustré en c : la stabilité relative en fréquence d'une horloge atomique au césium augmente avec le temps pendant lequel on calcule la moyenne des erreurs aléatoires, étant donné que c'est le bruit blanc qui limite initialement la précision de la mesure. À partir d'un certain point, le bruit en  $1/f$  prédomine et la stabilité relative reste constante.

turbées par des bruits et délivrent des impulsions à des intervalles irréguliers. La stabilité relative d'une horloge est mesurée par la variation du nombre d'impulsions qu'elle fournit dans un intervalle de temps donné. Si le bruit qui perturbe une horloge est un bruit blanc, alors le nombre d'impulsions peut varier fortement sur des intervalles courts ; cependant, quand la longueur de l'intervalle temporel augmente, les erreurs tendent à se compenser et à s'annuler ; dès lors, l'horloge est plus précise sur de longues périodes que sur des périodes courtes. Quand la durée de la mesure augmente, l'erreur relative pendant le temps mesuré diminue.

Si, toutefois, le bruit est de type  $1/f$ , lorsque l'on augmente la durée de la mesure, on introduit simultanément une quantité de bruit toujours plus grande. Les deux effets se compensent, et l'allongement de la durée de la mesure n'améliore rien. Ainsi, la stabilité d'une horloge de précision croît à mesure qu'augmente le temps sur lequel on calcule la moyenne des erreurs aléatoires, parce que c'est le bruit blanc qui limite la précision de la mesure. À partir d'un certain point, toutefois, le bruit en  $1/f$  devient prépondérant et la stabilité relative reste constante (voir la figure 6).

Si l'on considère l'ubiquité du bruit en  $1/f$  et l'impossibilité de l'éliminer dans des systèmes mécaniques et électroniques de mesure, il est évident que analyses du même type peuvent être étendues à d'autres types de mesures de précision, et le bruit en  $1/f$  constitue ainsi plus qu'une simple curiosité : il est à même d'exercer une influence profonde sur notre capacité à connaître la Nature avec précision.

Edoardo MILOTTI est chercheur à l'Université de Trieste.

H. William PRESS, *Flicker Noises in Astronomy and Elsewhere*, in *Comments on Astrophysics*, n° 7, pp. 103-119, février 1978.

M.B. WEISSMAN, *1/f Noise and other Slow, Nonexponential Kinetics in Condensed Matter*, in *Review of Modern Physics*, n° 60, pp. 537-571, avril 1988.

W.E. ITANO et N.F. RAMSEY, *La misura precisa del tempo*, in *Le Scienze*, n° 301, p. 36, septembre 1993.

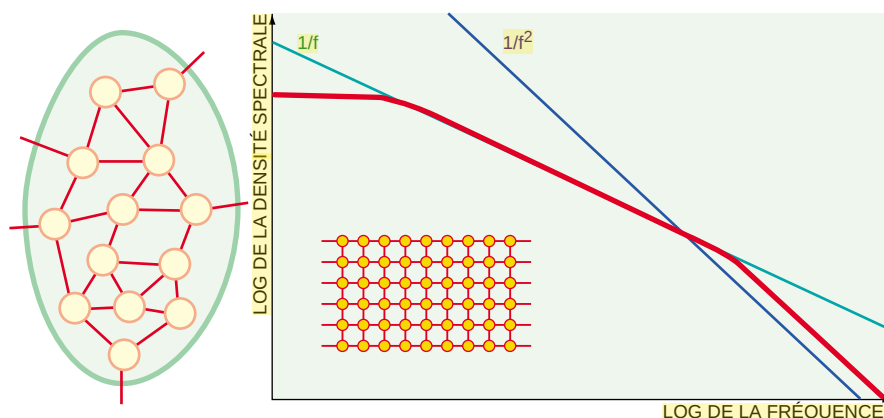
Edoardo MILOTTI, *Linear Processes that Produce 1/f or Flicker Noise*, in *Physical Review*, E51, pp. 3087-3103, avril 1995.

«mémoire» que la sortie de la charge du système est difficile. On démontre en effet que la largeur en  $1/f$  de la région centrale de la courbe est d'autant plus grande que le système se rapproche d'un système fermé. D'autres réseaux (ordonnés et désordonnés) de connectivités diverses manifestent le même comportement général, et la progression de la zone centrale est du type  $1/f^a$ , avec  $a$  compris entre 0,5 et 1,5.

## Mesures de précision

Même les appareils de mesure, tant mécaniques qu'électriques, sont perturbés par le bruit en  $1/f$ , et ce phénomène entraîne des conséquences importantes dans le cas des mesures de précision ; prenons pour exemple la mesure précise du temps.

Si une horloge était parfaite, elle délivrerait des impulsions à des intervalles fixes ; en réalité, les horloges sont per-



**7. RÉSEAU** où les nœuds peuvent interagir (des «charges» peuvent être transférées de l'un à l'autre et, pour certains, avec l'extérieur). Le trait vert divise l'«intérieur» et l'«extérieur» du système. Le nombre de liaisons entre un nœud et ses voisins est variable, et la force de cette liaison peut être plus ou moins grande. La «charge» est une charge électrique, ou une quantité de fluide, ou autre chose encore : le modèle est générique et ne se réfère à aucun système physique particulier. La courbe rouge dans la figure de droite indique la densité spectrale que l'on obtient pour un réseau carré à deux dimensions tel que celui illustré en bas à gauche lorsque la «charge» qui entre dans le système est équilibrée par celle qui en sort. La région centrale de la densité spectrale est exactement du type  $1/f$ , tandis qu'elle s'aplatit aux basses fréquences et devient de type  $1/f^2$  aux hautes fréquences. L'extension de la région du type  $1/f$  dépend des caractéristiques d'entrée et de sortie du réseau : plus il est difficile d'entrer ou de sortir du réseau, plus la région en  $1/f$  est étendue.