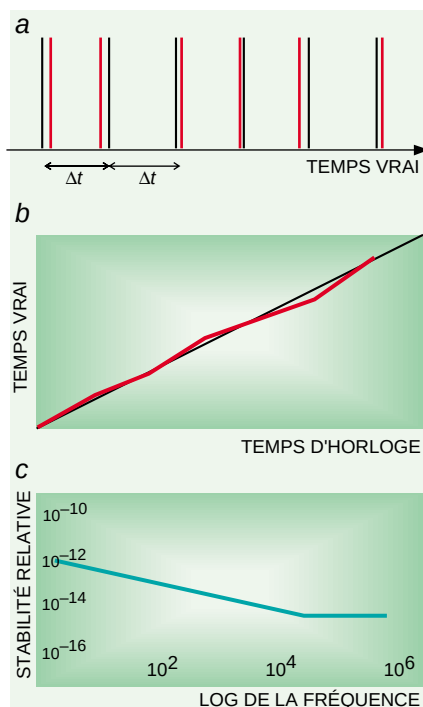




6. UNE HORLOGE EXACTE donne des impulsions à intervalles réguliers, comme ceux indiqués en noir (a). Les horloges réelles sont perturbées par des signaux de bruit et donnent des impulsions à intervalles irréguliers, comme indiqué en rouge. La courbe en rouge (b) compare le temps que nous mesurons avec 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.

«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

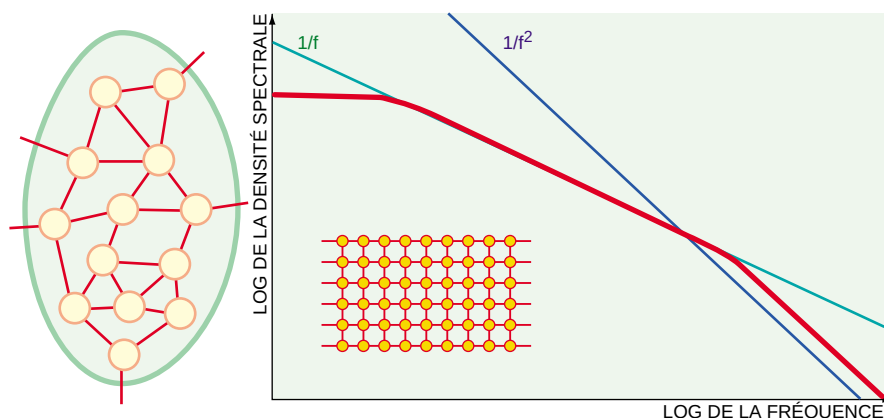
Même les appareils de mesure, tant mécaniques qu'électriques, sont perturbés par le bruit en $1/f$, et ce phénomène entraîne des conséquences importantes dans le cas des mesures de précision ; prenons pour exemple la mesure précise du temps.

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

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.



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.

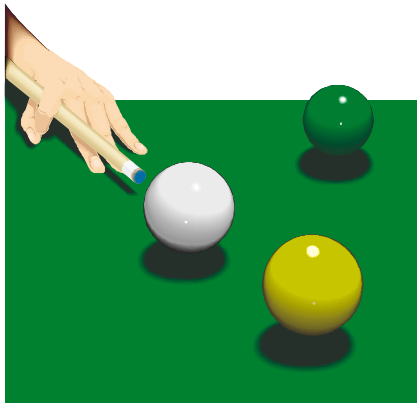
Edoardo MILOTTI est chercheur à l'Université de Trieste.

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.



La pratique du billard

RÉGIS PETIT

La connaissance des lois de la physique assure une pratique raisonnée et plus sûre. Elle détermine et explique les réglages utilisés par le joueur.

Il existe plusieurs types de billards. Le billard du mathématicien est un billard puissamment idéalisé où les billes sont des points, où les frottements n'existent pas, et où les lois de rebond sont celles de l'optique. Ce billard, dit le physicien, n'a pas de réalité. Le physicien imagine un billard moins idéalisé, où les frottements influent sur la trajectoire des billes, mais il n'a pas l'intelligence «du bout des doigts» du praticien. Nous allons examiner ici comment les règles physiques et mathématiques nous aident à pratiquer ce noble jeu.

Le jeu de billard actuel existe depuis environ un siècle et rassemble de plus en plus d'adeptes, en particulier le billard français ou «carambole» qui se joue avec trois billes et selon cinq spécialités : partie libre, jeux de cadre, jeu par une bande, jeu par trois bandes, billard artistique. L'une d'elles, le «trois bandes», s'est développée à l'étranger, principalement aux États-Unis et au Japon ; les échanges sur Internet, notamment dans le groupe «rec.sport.billiard», sont riches d'enseignements.

Le billard est avant tout un jeu de pratique, fondé sur la connaissance et la maîtrise d'un certain nombre de techniques (par exemple, le «rétro», le «coulé», le «massé», etc.) et de tactiques (par exemple, le «placement», le «rap-

pel», l'«amorti», etc.). La théorie du billard est fondée uniquement sur la mécanique du solide. Le premier traité théorique sur la mécanique des effets du jeu de billard est à notre connaissance celui de G.G. Coriolis, publié en 1835. D'autres traités ont ensuite suivi, tant en France qu'à l'étranger. Entre ces deux approches, l'une très pratique et l'autre très théorique, rares sont les ouvrages qui font le lien ou la synthèse. Est-il vraiment possible d'aborder la pratique du billard sous l'angle de la mécanique et des mathématiques ? Existe-t-il une «pratique raisonnée» du billard ? Dans mon livre récemment paru (voir la bibliographie), et dont cet article est inspiré, les lecteurs intéressés trouveront les justifications mathématiques des affirmations présentées ici.

Pour répondre à la question : «Comment utiliser les connaissances de mécanique ?», nous prendrons pour exemple la réalisation d'un «coulé» par trois bandes avec contournement de la bille numéro 3. L'objectif est de choquer la bille numéro 2 avec la bille numéro 1, puis de contourner la bille numéro 3, de faire le tour du billard en choquant successivement les trois bandes, et enfin de faire le point sur la bille numéro 3. Pour ce coup, quatre réglages suffisent, la hauteur d'attaque, la quantité de bille, la force du coup de queue et l'effet de côté.

RÉGLAGE DE LA HAUTEUR D'ATTAQUE

Le premier réglage que doit maîtriser tout joueur de billard est ici la hauteur d'attaque prise sur la bille numéro 1. Trois possibilités sont offertes *a priori* au joueur : attaque plus ou moins basse ; plus ou moins haute ; très haute. L'objectif à atteindre est de choquer la bille numéro 2, puis la grande bande située derrière cette bille. La mécanique du mouvement des billes nous enseigne que, après un choc entre deux billes, la trajectoire de chaque bille est une courbe parabolique, suivie éventuellement d'un segment de droite. Pour obtenir une courbe dont la concavité est tournée vers l'avant et qui frappe la grande bande avant la petite, il faut animer la bille numéro 1 d'une forte rotation en avant pour que cette bille puisse se rabattre le plus rapidement possible vers la grande bande, après le choc entre billes. En pratique, cela s'obtient par une attaque très haute de la bille numéro 1. Le pourquoi de cette attaque haute est esquissé sur la figure ci-contre (voir *Choc frontal* et *Choc oblique de deux billes*).

RÉGLAGE DE LA QUANTITÉ DE BILLE

Le second réglage à maîtriser est ici la quantité de bille prise sur la bille numéro 2. À nouveau, trois possibilités sont offertes au joueur : 1/2 bille ; 3/4 bille ; presque plein. L'objectif est de contourner la bille numéro 3 après le choc sur la bille numéro 2. La mécanique des chocs entre deux solides nous apprend que, juste après un choc parfaitement élastique entre une bille mobile et une bille immobile de même masse, la bille mobile rebondit toujours en suivant la tangente au point de choc. Pour éviter au maximum la bille numéro 3, il faut donc relever cette tangente le plus possible, tout en gardant suffisamment de vitesse pour choquer ensuite les trois bandes. En pratique, le 1/2 bille ne relève pas suffi-

