

que le début et la fin d'un train d'onde sont difficiles à déterminer, on localise facilement le maximum à moins d'une fraction de picoseconde, de sorte que l'on mesure la longueur de propagation de l'onde à moins d'un dixième de nanomètre près. La méthode de comparaison des profils est analogue à l'interférométrie.

Ayant mis au point ce procédé, certains physiciens de notre équipe se demandèrent si, avec notre système, nous pourrions faire de la musique : ne savions-nous pas déjà faire des sons ? En collaboration avec des ingénieurs du Centre de recherche IBM de Yorktown Heights, nous avons alors réalisé un «nanoxylophone», dont chaque élément vibrant est une lamelle d'or de moins de 40 nanomètres d'épaisseur et de 200 nanomètres de large. Lorsque nous envoyons une impulsion lumineuse sur une de ces lamelles, nous obtenons un son à une fréquence de huit gigahertz, environ 24 octaves au-dessus du *do* central du piano.

Nous avons également trouvé d'autres structures qui vibrent lorsqu'elles sont excitées par une impulsion lumineuse. Le ton le plus élevé que nous ayons atteint a une fréquence égale à 700 gigahertz, sept octaves au-dessus de la précédente. Toutefois notre nanoxylophone est un médiocre instrument de musique, car toutes ses lamelles produisent à peu près la même note.

À côté de ces explorations acoustiques, certains d'entre nous se préoccupaient de la mise au point de tests non destructifs des circuits intégrés. La fabrication de tels circuits nécessite plusieurs centaines d'étapes et des semaines de travail. Après la découpe d'un barreau de silicium très pur en galettes de 20 centimètres de diamètre et d'une fraction de millimètre d'épaisseur, on effectue un polissage, puis on injecte des impuretés sélectionnées, qui modifient la conduction électrique locale. Le semi-conducteur est alors recouvert de diverses couches minces, métalliques ou isolantes.

Les couches métalliques qui relient électriquement les différentes parties du circuit forment un réseau sur toute

la galette de silicium, à la manière d'un réseau autoroutier, avec ses ponts et ses échangeurs. Les couches isolantes, composées de silice ou de polymères, séparent les couches de métal. En fin de fabrication, les galettes sont découpées en une centaine de circuits intégrés.

Toute perturbation du processus de fabrication peut conduire à un désastre. Notamment l'ensemble du travail doit se faire en salle blanche, car la moindre particule de poussière bloque le fonctionnement des transistors. Or tous les transistors d'un circuit doivent être synchronisés pour que le circuit complet fonctionne ; cette synchronisation dépend des temps de transfert des signaux et de la résistance électrique de la couche métallique qui sépare les transistors. Comme cette résistance est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche métallique, le contrôle des épaisseurs est fondamental.

Une puce et au-delà

L'acoustique picoseconde permet aux fabricants de mesurer l'épaisseur des couches dans les circuits intégrés. Une impulsion lumineuse, focalisée sur la partie de composant à étudier, est absorbée par la couche supérieure du circuit. L'échauffement et la dilatation qui en résultent engendrent des ondes de pression qui se propagent au travers de l'empilement. Chaque fois que l'onde de pression rencontre une interface entre deux couches, une partie du signal est réfléchi. En mesurant les temps mis par ces échos pour revenir en surface, on détermine l'épaisseur de chaque couche avec précision.

Cette méthode est analogue aux techniques sismiques que les géophysiciens utilisent pour déterminer l'épaisseur des diverses couches de la croûte terrestre, mais les couches sont si minces que les échos se rejoignent et interfèrent. Le phénomène est analogue à celui que l'on observe quand de la lumière se réfléchit sur une couche d'huile à la surface de l'eau : les interférences conduisent à des figures irisées. Dans le cas des circuits testés par acoustique picoseconde, les ondes produi-

sent des battements qu'on doit déchiffrer pour en extraire des renseignements sur la géométrie et la taille des couches.

Les échos révèlent de nombreuses autres caractéristiques des couches empilées. Lorsqu'une impulsion de pression se réfléchit sur une surface irrégulière, l'onde se disperse dans l'espace et dans le temps. L'analyse des formes d'ondes donne une idée de la rugosité de la surface. De même, l'amplitude de l'écho révèle la qualité de la jonction entre deux couches : lorsque le contact entre deux films est mauvais, par exemple en raison d'une contamination, l'onde ne franchit pas l'interface, de sorte que le signal réfléchi est anormalement intense.

Maintenant que l'acoustique picoseconde a fait ses preuves pour l'étude des circuits intégrés, nous cherchons à l'utiliser pour étudier des systèmes plus compliqués. Les médecins utilisent déjà des échographies pour surveiller le bon développement des fœtus, *in utero*. À l'aide des ultrasons picosecondes, nous espérons sonder l'intérieur d'une cellule vivante. Nous voudrions créer des images acoustiques des cellules et analyser leur fonctionnement. Notamment nous cherchons à réaliser des images fines du cytosquelette (le réseau qui soutient l'ensemble de la cellule), afin de réaliser l'équivalent des radiographies, mais à l'échelle microscopique.

Humphrey MARIS est professeur de physique à l'Université Brown.

H.-N. LIN et al., *Study of Vibrational Modes of Gold Nanostructures by Picosecond Ultrasonics*, in *Journal of Applied Physics*, vol. 73, n° 6, pp. 37-45, 1er janvier 1993.

Stephen A. CAMPBELL, *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press, 1996.

Bernard PERRIN, Bernard NONELLO, Jean-Claude JEANNET et Alain MARILLIER, *Développements récents en acoustique picoseconde*, Actes du 4e Congrès français d'acoustique, vol. 1, p. 117, 1997.

C.J. MORATH et al., *Ultrasonic Multilayer Metal Film Metrology*, in *Solid State Technology*, vol. 40, n° 6, pp. 85-92, juin 1997.



Aléas du hasard informatique

JEAN-PAUL DELAHAYE

Le vrai hasard étant hasardeux, contentons-nous d'un pseudo-hasard et adaptons-le à nos besoins.

Un calcul composé de milliards d'étapes successives peut être répété et donner exactement le même résultat : le hasard a été éliminé des systèmes informatiques. Cette extraordinaire maîtrise des petits courants électriques, que l'on combine pour exécuter un programme, est époustouflante. Dans nos ordinateurs, le hasard est maîtrisé jusqu'au niveau microscopique : il a disparu ! N'est-il pas étonnant qu'on en ait besoin ? Après avoir tout fait pour l'éliminer, il faut recréer le hasard...

Roland Moreno, plus connu pour son invention de la carte à puce, avait perfectionné, dans sa jeunesse journalistique, un dispositif automatique pour tirer à pile ou face. L'informatique supplée au tirage physique dans un grand nombre d'applications où il faut engendrer rapidement des chiffres aléatoires.

La difficulté est la suivante : il faut imiter autant que possible un tirage à pile ou face, où la connaissance d'un lancer ne permet pas de déterminer le résultat du lancer suivant, et ce, par un programme fondé sur une formule mathématique d'utilisation simple par l'ordinateur. Or, qui dit formule mathématique, dit déterminisme, donc un hasard limité.

NÉCESSITÉ DU HASARD

Le hasard est nécessaire dans les logiciels de *simulation* : pour reproduire des phénomènes aléatoires, il faut disposer de briques élémentaires d'aléas, c'est-à-dire de nombres aléatoires.

En *cryptographie* aussi, où, pour échapper aux espions, on doit déguiser les messages en les combinant avec des séquences de chiffres quelconques, c'est-à-dire aléatoires : on constate d'ailleurs qu'à partir d'un bon système de codage, on obtient un bon système de création de suites aléatoires et... inversement.

Le hasard est nécessaire en *théorie de l'information*, où les séquences au plus

fort contenu en information sont justement les séquences vraiment aléatoires. Aussi s'est développée une science de la production contrôlée de l'aléa, qui a aujourd'hui atteint un grand raffinement.

En réalité, il y a au moins trois disciplines dans la science du hasard : celle du *hasard faible*, utile pour les simulations, celle du *hasard moyen*, qui convient

en cryptographie, et celle du *hasard fort*, née de la théorie de l'information et de la calculabilité.

LE HASARD FAIBLE

Pour créer un nuage de points noirs destinés à colorier en gris une partie d'image (et plus généralement dans

TESTS SPECTRAUX : LES RÉSEAUX DE POINTS

Les générateurs congruentiels linéaires sont utilisés pour définir les fonctions *random* des langages de programmation. On se donne M , a et b , ainsi qu'un point de départ appelé *graine* $x(0)$ et l'on calcule $x(1)$, $x(2)$, etc., avec la formule :

$$x(n+1) = (a x(n) + b) \bmod M \quad u(n) = x(n)/M$$

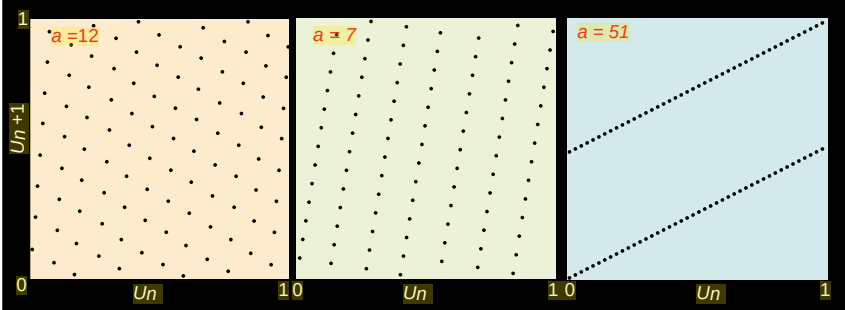
($z \bmod M$ désigne le reste de la division de z par M)

Pour en tester les qualités, en plus de la période qu'on s'arrange pour obtenir la plus grande possible, on associe à ces suites des points dans un espace de dimension deux ou plus. On obtient un réseau régulier dont les caractéristiques donnent des indications sur la qualité du générateur pseudo-aléatoire.

Exemple. Avec $M = 101$, $b = 0$. On représente les points de coordonnées $u(n)$, $u(n+1)$ pour trois valeurs de a , $a = 12$, $a = 7$, $a = 51$, $b = 0$.

La période est à chaque fois maximale, c'est-à-dire 100.

On voit très clairement la structure en réseau.



1. En prenant une suite pseudo-aléatoire de nombre entre 0 et 1, $u(0)$, $u(1)$, etc. et en dessinant les points $M(0) = (u(0), u(1))$, $M(1) = (u(1), u(2))$, etc., on obtient une figure où l'imperfection des $u(i)$ apparaît instantanément. Ici on examine les générateurs congruentiels linéaires. Pour $a = 12$, les points sont bien distribués (trop bien ?). Pour $a = 7$, le résultat est un peu moins bon, et pour $a = 51$, il n'est pas satisfaisant. Des méthodes mathématiques et des algorithmes spécialisés permettent de calculer les meilleurs jeux de paramètres pour que les réseaux (en dimension deux ou plus) soient satisfaisants. Un générateur de ce type, nommé RANDU, fut exploité pendant des années dans toutes sortes de logiciels (en particulier, dans le système d'exploitation des machines de la fameuse gamme IBM 360), avant qu'on ne découvre ses graves insuffisances. Les paramètres utilisés étaient : $M = 2^{31}$, $a = 65539$, $b = 0$.