

première expérience fut prometteur, mais non décisif, en partie parce qu'ils n'ont pu observer la réaction du plancton qu'une semaine durant. Le même groupe a répété l'expérience en 1995 et a pu poursuivre ses observations pendant quatre semaines : ils ont constaté sans ambiguïté que le fer ajouté accroît énormément la photosynthèse du phytoplancton, ce qui entraîne une «efflorescence» de ces micro-organismes, colorant les eaux en vert.

La fertilisation de l'océan

Depuis, trois autres groupes (en Nouvelle-Zélande, en Allemagne et aux États-Unis) ont démontré sans équivoque que l'ajout de petites quantités de fer dans l'océan Austral stimule la productivité du phytoplancton. L'expérience de fertilisation réalisée à plus grande échelle date des mois de janvier et de février 2002. Au cours du projet SOFeX, mené par l'Institut de recherche aquatique de la baie de Monterey et par le Laboratoire Moss Landing Marine, on a montré qu'une tonne de solution de fer dispersée sur environ 300 kilomètres carrés a décuplé la productivité primaire, en huit semaines.

Ces résultats ont convaincu la plupart des biologistes que le fer accélère la croissance du phytoplancton aux hautes latitudes, mais on ignore encore si cette productivité accrue renforce la pompe biologique et augmente le stockage de dioxyde de carbone dans les profondeurs de l'océan. Toutefois, selon les modèles mathématiques les plus récents, même si le phytoplancton incorporait tout l'azote et tout le phosphore disponibles dans les eaux de surface de l'océan Austral pendant les 100 prochaines années, 15 pour cent seulement du dioxyde de carbone libéré par la combustion des combustibles fossiles serait recapturé.

Malgré toutes les incertitudes concernant la fertilisation des océans, quelques groupes de laboratoires privés et publics travaillent sur des projets à grande échelle. Une entreprise a proposé de faire déverser par les navires de commerce qui traversent régulièrement l'océan Pacifique Sud de petites quantités d'un mélange d'«engrais». D'autres groupes étudient la possibilité de déclencher la floraison de phytoplancton en déversant directement dans les eaux côtières, par des tuyaux, des nutriments, dont le fer et l'ammoniaque.

Il n'est pas encore parfaitement établi que ces stratégies de fertilisation des océans soient un jour applicables. Pour être efficace, la fertilisation devra être conduite chaque année pendant des décennies. Comme la circulation océanique finit par remonter en surface les eaux profondes, tout le dioxyde de carbone supplémentaire stocké par la pompe biologique regagnerait l'atmosphère, quelques centaines d'années après la dernière campagne de fertilisation. En outre, quelles seraient les conséquences de telles opérations ? Les fermiers ne parviennent pas à confiner les engrais dans un champ, alors que dire de fertilisants déversés dans des océans turbulents ? Pour cette raison, de nombreux experts craignent que cette fertilisation à grande échelle cause des dommages à long terme qui seraient difficiles, voire impossibles, à endiguer.

Ainsi, on risquerait de perturber la chaîne alimentaire marine. Les simulations informatiques et les études des efflorescences naturelles de phytoplancton montrent que l'augmentation de la productivité primaire entraînerait un déficit en oxygène. Les micro-organismes qui consomment les cellules de phytoplancton mortes lorsqu'elles sombrent dans les profondeurs consomment parfois l'oxygène plus vite que

la circulation océanique ne le remplace. Dans ces conditions, les animaux incapables de s'échapper vers des eaux plus riches en oxygène suffoqueraient.

Solution providentielle ou boîte de Pandore ?

De telles conditions favorisent également la croissance de microbes qui produisent du méthane et de l'oxyde d'azote, deux gaz à effet de serre dont la capacité à piéger la chaleur est supérieure à celle du dioxyde de carbone. D'après l'Office américain des océans et de l'atmosphère, un déficit en oxygène et d'autres difficultés dues à l'excès de nutriments ont déjà dégradé la qualité de l'eau sur plus de la moitié des côtes des États-Unis ; c'est notamment le cas de la «zone morte» dans la partie Nord du golfe du Mexique. Des difficultés similaires surgissent dans diverses régions du monde.

Même si les éventuelles conséquences néfastes de la fertilisation étaient jugées acceptables, encore faudrait-il s'assurer que de telles mesures compenseraient les réactions des plantes et des océans à un monde plus chaud. En comparant des images obtenues par satellites au début des années 1980 et dans les années 1990, on constate que l'océan a tendance à verdir, mais plusieurs biologistes ont souligné qu'une augmentation de la productivité primaire ne garantit pas un stockage plus important du carbone dans les profondeurs océaniques. Ce pourrait même être l'inverse qui se produit. Selon des simulations numériques, le réchauffement augmenterait la stratification de l'océan, l'eau douce venant de la fonte des glaciers et des icebergs restant au-dessus de l'eau de mer salée, plus dense. Une telle stratification ralentirait la capacité de la pompe biologique à transporter le carbone de la surface vers les profondeurs.

De nouveaux satellites observent quotidiennement le phytoplancton, et les futures expériences de fertilisation à petite échelle nous permettront de mieux comprendre le comportement du phytoplancton. L'idée de développer de grands projets de fertilisation des océans pour modifier le climat reste débattue au sein de la communauté scientifique et parmi les autorités politiques. Pour beaucoup, le bénéfice temporaire des projets de fertilisation ne justifie pas les dégâts, imprévisibles, mais inévitables, que subiront les écosystèmes marins. Aujourd'hui, la société voudrait en appeler au phytoplancton actuel pour l'aider à résoudre un problème lié en partie à la combustion du phytoplancton fossile !

Paul FALKOWSKI est professeur à l'Institut de sciences marines et côtières et au Département de géologie de l'Université Rutgers.

Paul FALKOWSKI et John RAVEN, *Aquatic Photosynthesis*, Blackwell Scientific, 1997.

Paul FALKOWSKI et al., *The Global Carbon Cycle : A Test of Our Knowledge of the Earth as a System*, in *Science*, vol. 290, pp. 291-294, 13 octobre 2000.

P. CHISHOLM, *Stirring times in the Southern Ocean*, in *Nature*, vol. 407, pp. 685-687, 2001.

Z. NEUFELD, P. HAYNES, V. GARÇON et J. SUDRE, *Ocean fertilization experiments may initiate a large scale phytoplankton bloom*, in *Geophysical Research Letters*, n°1129, 10.1029/2001GL013677, 2002.

Ordinateurs asynchrones

IVAN SUTHERLAND • JO EBERGEN

Des puces qui ne sont pas contrôlées par une horloge centrale améliorent les performances des ordinateurs en permettant à chaque circuit de travailler au maximum de ses possibilités.

Quelle est la vitesse de votre ordinateur ? Si son acquisition date de moins de six mois, vous répondriez sans doute : deux gigahertz. Cette fréquence est celle d'une minuscule horloge – il s'agit, comme dans une montre, d'un oscillateur à quartz – contenue dans l'ordinateur qui détermine le rythme de fonctionnement de l'ensemble de la machine. Dans un ordinateur cadencé à un gigahertz, par exemple, le cristal fait «tic» un milliard de fois par seconde, c'est-à-dire que les tâches effectuées par l'ordinateur sont décomposées en opérations élémentaires qui durent chacune un milliardième de seconde. Un transfert de données simple s'effectue en une seule étape, des calculs complexes peuvent en nécessiter de nombreuses, mais, au final, la puissance d'un ordinateur est approximativement proportionnelle à la fréquence de son horloge.

La plupart des ordinateurs modernes, qualifiés de synchrones, utilisent une fréquence unique pour l'ensemble des circuits du microprocesseur. La synchronisation est assurée par un système qui distribue les impulsions de l'oscillateur à quartz à tous les circuits. Si la synchronisation générale des circuits a certains avantages, la distribution d'impulsions de plus en plus rapides présente une difficulté croissante. De surcroît, les transistors actuels traitent les données si vite qu'ils peuvent accomplir plusieurs opérations élémentaires pendant le temps que met une impulsion à être acheminée d'un bout à l'autre de la puce. La conservation de la synchronisation dans un tel circuit nécessite des puces parfaitement conçues (surtout quand elles sont de grande taille), et entraîne une consommation importante d'électricité.

Différentes équipes, dont la nôtre, aux Laboratoires *Sun Microsystems*, cherchent comment s'affranchir du principe de synchronisme. Nous explorons divers systèmes informatiques où chaque élément fonctionnerait à son propre rythme, sans avoir à obéir à une horloge centrale. Ces systèmes sont nommés asynchrones. Chaque élément d'un système asynchrone peut réduire ou augmenter, selon les besoins, sa propre fréquence d'horloge, tout comme un coureur allonge ou raccourcit sa foulée en fonction du terrain. Certains des pionniers de l'ère informatique, tel le mathématicien Alan Turing, ont tenté de concevoir des machines asynchrones dès les années 1950. Les ingénieurs avaient rapidement écarté cette approche au profit des systèmes synchrones, plus simples à développer.

L'informatique asynchrone connaît aujourd'hui une renaissance. Des informaticiens de l'Université de Manchester, de l'Université de Tokyo et de l'Institut de technologie de Californie ont mis au point des microprocesseurs asynchrones.

Quelques puces asynchrones sont d'ores et déjà produites en masse à des fins commerciales. À la fin des années 1990, la société d'électronique japonaise *Sharp* a construit sur un concept asynchrone un processeur multimédia – une puce d'édition graphique, vidéo et audio. *Philips Electronics*, de son côté, a produit un microcontrôleur asynchrone pour deux de ses messageries de poche. Des composants asynchrones intégrés dans des systèmes synchrones commencent également à apparaître, tels ceux qu'a conçus notre groupe et qui équipent l'un des nouveaux processeurs de *Sun Microsystems*. Nous sommes persuadés que les systèmes asynchrones se généraliseront à mesure que les informaticiens apprendront à tirer parti de leurs avantages et à simplifier leur construction. Les fabricants de puces asynchrones ont déjà réalisé de belles prouesses techniques, mais le succès commercial n'est pas encore au rendez-vous. Il reste beaucoup de chemin à parcourir avant que toutes les promesses des ordinateurs asynchrones ne se concrétisent.

Contre la montre

Quels sont les avantages des systèmes asynchrones ? En premier lieu, les systèmes asynchrones apportent un gain de vitesse. Dans une puce synchrone, la cadence de l'horloge doit être au moins aussi lente que le plus lent des circuits de la puce. S'il faut un milliardième de seconde à l'un des circuits pour effectuer une opération, la puce ne peut pas fonctionner à plus d'un gigahertz. Même si la plupart des autres circuits de cette puce sont capables de réaliser leurs opérations en un temps plus court, ils doivent attendre le signal de l'horloge pour passer à l'étape logique suivante. À l'inverse, dans un système asynchrone, les éléments autonomes du processeur travaillent à leur rythme : il dispose exactement du temps qui leur est nécessaire pour exécuter une tâche. Ainsi les opérations simples sont effectuées plus rapidement que la moyenne, le gain de temps pouvant être attribué aux opérations complexes, plus longues. Les tâches de calcul commencent dès que les actions préalables ont été réalisées, sans attendre le signal suivant de l'horloge. De cette façon, la vitesse d'un système asynchrone dépend de la durée d'action moyenne, plutôt que de la plus grande durée d'action.

Cependant, la coordination d'actions asynchrones nécessite, elle aussi, du temps et de la place sur les puces. Dans le cas où les contraintes imposées par une coordination locale sont faibles, un système asynchrone peut être plus rapide en moyenne qu'un système synchrone. Ainsi,

l'asynchronisme est particulièrement indiqué pour les puces où les tâches lentes interviennent de façon irrégulière.

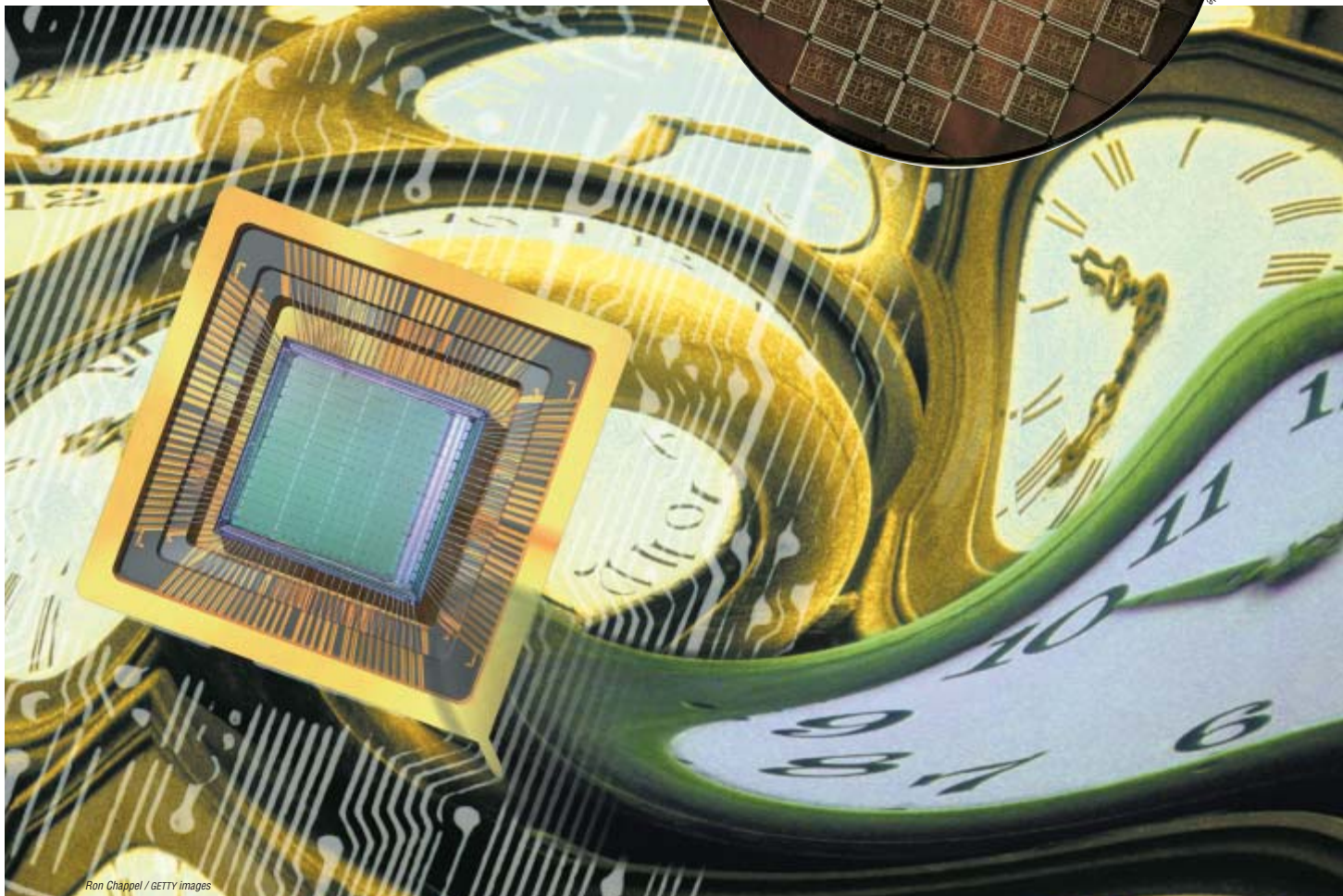
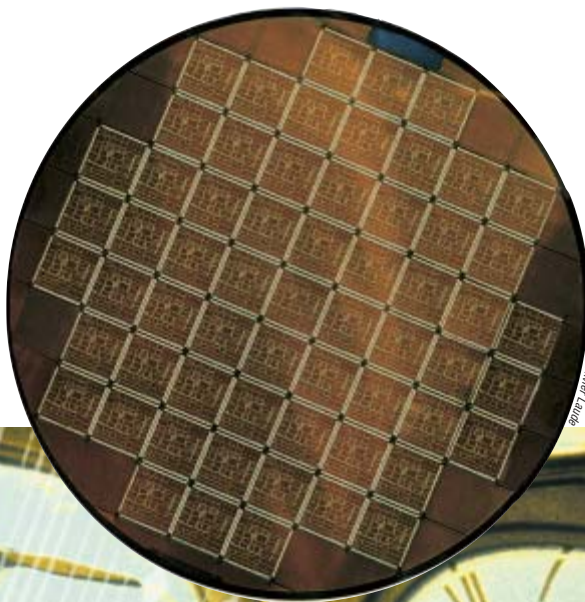
Une conception asynchrone peut également permettre de réduire la consommation électrique des puces. Dans les puces massives actuelles, les circuits qui émettent les signaux d'horloge occupent une bonne partie de la surface : environ 30 pour cent de l'électricité consommée par la puce est allouée à l'horloge et à son système de distribution. De surcroît, comme l'horloge est constamment en activité, elle produit de la chaleur même quand la puce ne fonctionne pas.

Dans les systèmes asynchrones, les parties inactives de la puce ne consomment quasiment rien. Cette caractéristique est particulièrement intéressante dans les équipements fonctionnant sur piles, mais elle peut également contribuer à réduire les coûts de fonctionnement de machines plus volumineuses qui nécessitent d'être refroidies par des dispositifs de ventilation et de climatisation, qui évitent toute surchauffe du système. La quantité d'élec-

tricité ainsi économisée dépend du type d'activité de la machine. Les systèmes dont certaines parties sont souvent au repos y gagnent plus que les systèmes en fonctionnement continu. La plupart des ordinateurs comportent des composants inactifs pendant de longues périodes, telle l'unité de calcul en virgule flottante.

Par ailleurs, les systèmes asynchrones produisent moins d'interférences radio que les machines synchrones. Comme les systèmes cadencés fonctionnent à un rythme fixe, ils émettent un fort signal radio correspondant à leur fréquence de fonctionnement et à ses harmoniques (des ondes dont la

1. LES PROCESSEURS MODERNES, pour la plupart, sont synchrones : les circuits fonctionnent au même rythme, imposé par une horloge centrale. Les informaticiens construisent désormais des systèmes asynchrones qui traitent des données sans être soumis à la cadence d'une horloge. Les avantages potentiels des circuits asynchrones sont notamment des vitesses de fonctionnement supérieures, une consommation électrique réduite et des interférences radio négligeables. Ci-contre, une tranche de silicium contenant des puces électroniques asynchrones UltraSPARC IIII développées par les Laboratoires *Sun Microsystems*.



Ron Chappel / GETTY Images