

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

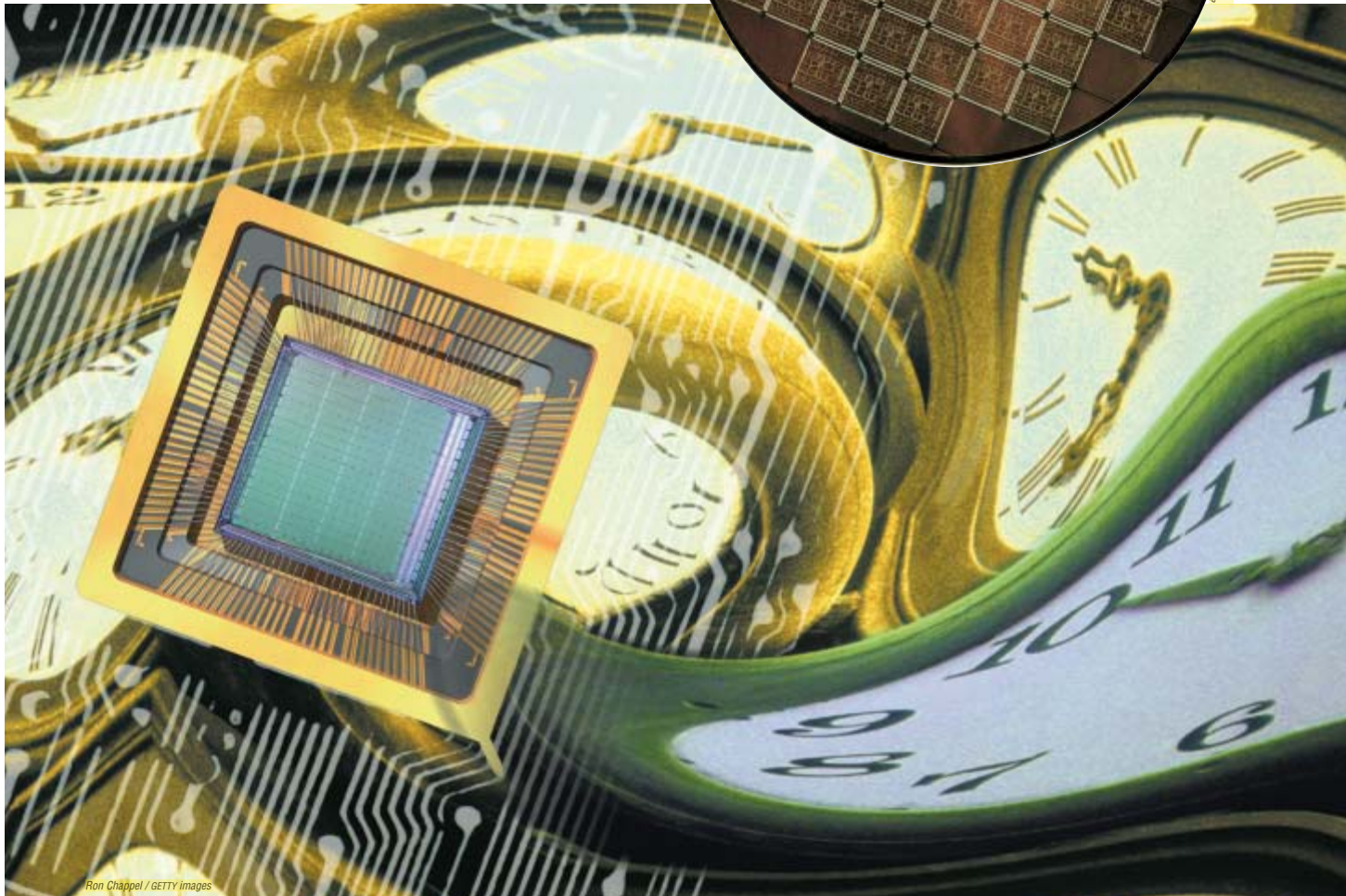
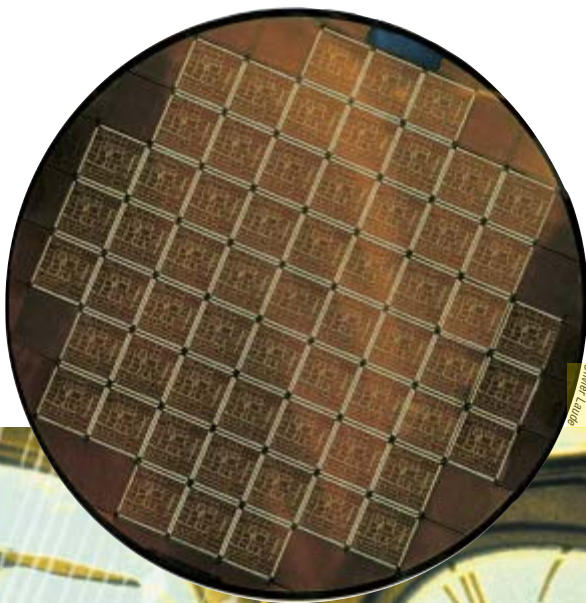
Une conception asynchrone peut également permettre de réduire la consommation électrique des puces. Dans les puces massives actuelles, les circuits qui émettent les signaux d'horloge occupent une bonne partie de la surface : environ 30 pour cent de l'électricité consommée par la puce est allouée à l'horloge 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.

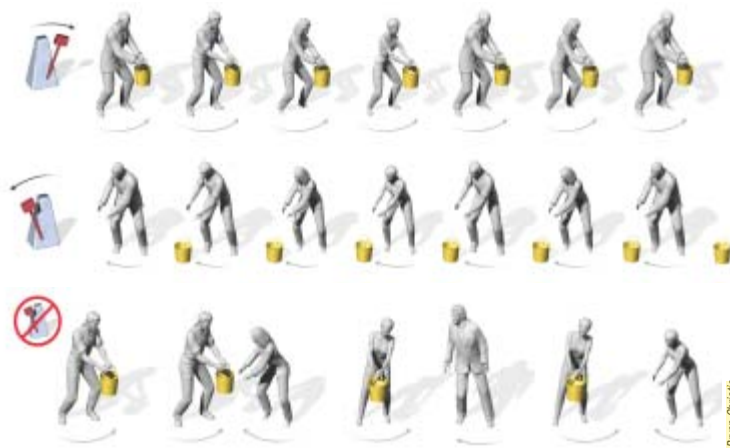
Dans les systèmes asynchrones, les parties inactives de la puce ne consomment quasiment rien. Cette caractéristique est particulièrement intéressante dans les équipements fonctionnant sur piles, mais elle peut également contribuer à réduire les coûts de fonctionnement de machines plus volumineuses qui 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.





2. LES CHÂÎNES DE PASSEURS DE SEAUX : on peut utiliser cette métaphore pour décrire le flux des données dans un ordinateur. Un système informatique synchrone est comparable à une chaîne de passeurs où chaque personne reçoit et passe les seaux au rythme du tic-tac d'une horloge. Quand l'horloge fait «tic», chaque passeur avance son seau vers la personne suivante (*en haut*). Quand l'horloge fait «tac», chaque passeur attrape le seau posé par la personne précédente (*au milieu*). Au contraire, un système asynchrone ressemble à une chaîne de passeurs ordinaire : chaque personne tenant un seau peut le passer à la suivante dès qu'elle a les mains libres (*en bas*). Le désordre engendré par cette perte de cohésion complique certes la conception des puces, mais le flux de données traitées augmente : la vitesse de la chaîne n'est plus limitée par le circuit le plus lent.

fréquence est un multiple de la fréquence originelle). De tels signaux peuvent interférer avec les téléphones portables, la télévision et les systèmes de navigation des avions qui emploient les mêmes fréquences. Comme les systèmes asynchrones n'ont pas de cadence fixe, ils répartissent leur énergie de rayonnement sur l'ensemble du spectre radio, de sorte que l'émission dans chacune des fréquences est faible.

La conception asynchrone présente un avantage supplémentaire : elle permet la construction de ponts entre des ordinateurs de fréquences différentes. Les réseaux d'ordinateurs hétérogènes – on les nomme des grappes – qui prolifèrent depuis quelques années, mettent en relation des ordinateurs rapides avec des machines plus lentes, qui, sinon, auraient été mises au rebut. Ces grappes permettent de traiter des problèmes complexes en répartissant les tâches de calcul entre les différentes machines. Un tel système est par essence asynchrone : les divers constituants ont des cadences différentes. Le transfert de données contrôlées par une horloge vers une machine contrôlée par une autre horloge nécessite des ponts asynchrones, car les données peuvent être, au cours des calculs, «désynchronisées» par rapport à l'horloge de l'ordinateur qui reçoit l'information.

En dernier lieu, bien que la conception asynchrone présente des difficultés, elle offre une grande flexibilité. Étant donné que les circuits d'un système asynchrone ne sont pas tenus de suivre tous le même rythme, les concepteurs ont plus de liberté pour choisir quelles parties du système participeront au calcul, et pour décider comment elles interagiront. En outre, le remplacement de n'importe quelle partie par une version plus rapide augmente la vitesse de l'ensemble du système, alors que dans un système cadencé, l'augmentation de la vitesse nécessite généralement la mise à jour de tous les constituants.

Afin de décrire le fonctionnement des systèmes asynchrones, nous utilisons souvent la métaphore d'une chaîne de passeurs de seaux. Un système cadencé est comparable à une chaîne de passeurs de seaux où chaque participant doit passer et recevoir les seaux au rythme d'une horloge. Au premier «tic», chacun pose son seau devant son voisin de gauche, par exemple ; quand l'horloge fait «tac», chacun attrape le seau déposé par le voisin (*voir la figure 2*). Le rythme de cette chaîne est défini par le temps que met la personne la plus lente de la chaîne à déplacer le seau le plus lourd. Même si les seaux sont légers, tout le monde doit attendre le battement de l'horloge avant de passer le seau suivant.

Coopération locale

Dans une chaîne de passeurs de seaux asynchrones, c'est la coopération locale qui détermine le rythme, et non une horloge commune. Chaque personne tenant un seau peut le passer à la suivante dès que cette dernière a les mains libres. Quand les seaux sont légers, ils font rapidement le trajet d'un bout à l'autre de la chaîne. De surcroît, quand il n'y a pas d'eau à transporter, tout le monde peut se reposer en attendant. Si une personne lente ralentit l'ensemble de la chaîne, on la remplace et l'ensemble retrouve des performances optimales.

Dans les ordinateurs, les chaînes de passeurs de seaux sont nommées des «pipelines». Un pipeline ordinaire comporte environ une demi-douzaine de relais, ayant chacun un rôle analogue à celui d'un des passeurs de seaux. Au lieu de manipuler des seaux d'eau, chaque relais effectue l'une des tâches nécessaires à l'exécution de l'instruction. Par exemple, un processeur exécutant l'instruction $C = A + B$ doit aller chercher la signification de l'instruction «+» dans la mémoire, récupérer les nombres correspondant à A et B, en faire la somme et stocker le résultat dans la mémoire C.

Un pipeline cadencé effectue ces opérations à un rythme ne dépendant ni de l'opération à effectuer ni de la taille des nombres. Additionner 1 et 1 demande autant de temps qu'additionner deux nombres de 30 chiffres. En revanche, dans un pipeline asynchrone, la durée de chaque action dépend de l'opération effectuée, de la taille des nombres ainsi que de l'emplacement des données dans la mémoire (de la même manière que dans la chaîne de passeurs, la quantité d'eau dans un seau peut influencer sur le temps qu'il faut pour le passer). Sans horloge pour réguler ses actions, un circuit asynchrone recourt à des circuits de coordination locale. Ces circuits échangent des signaux de fin d'exécution afin de s'assurer qu'à chaque étape les actions ne commencent que lorsque le circuit dispose de toutes les données nécessaires. Les deux circuits de coordination les plus importants sont nommés le *Rendez-vous* et l'*Arbitre*.

Un élément *Rendez-vous* indique le moment où toutes les données requises par un circuit pour effectuer une tâche sont parvenues à destination. Par exemple, un circuit de division arithmétique doit disposer à la fois du dividende (par exemple 16) et du diviseur (par exemple 2) avant de pouvoir diviser l'un par l'autre (et donner le résultat 8).

Un type de circuit *Rendez-vous* est nommé élément C de Muller, du nom de David Muller, qui fut professeur à l'Université de l'Illinois. Un élément C de Muller est un circuit logique avec deux entrées et une sortie (*voir l'encadré page 39*). Quand les deux entrées d'un élément C de Muller sont VRAI, sa sortie devient VRAI. Quand les deux entrées