

Les instruments de SOHO sont commandés du Centre opérationnel situé au Centre Goddard de la NASA, près de Washington. Ce centre permet une planification quotidienne des observations et un contact quasi permanent, aussi bien pour la réception des données (50 kilobits par seconde en continu) que pour l'envoi des commandes

Pour faciliter et accroître la participation des scientifiques européens, l'Institut d'astrophysique

spatiale et le CNRS ont établi, à Orsay, un centre d'opérations, d'analyse et d'archivage des données (MEDOC). Les données d'observations y parviennent en direct du centre américain. Elles sont alors traitées et mises à la disposition des utilisateurs. Il est également possible d'y programmer des observations. Enfin, le MEDOC assure à Orsay, bientôt à Toulouse, l'archivage des données au titre de Centre d'archivage européen de SOHO.

SWAN détecte la structure du vent solaire : il a montré que le vent solaire est plus intense dans le plan équatorial du Soleil qu'au-dessus des pôles Nord et Sud.

## Sur la Terre

Alors que l'économie mondiale se fonde progressivement sur des satellites en orbite autour de la Terre, elle devient plus vulnérable aux influences magnétiques solaires. Outre les tempêtes magnétiques, des éruptions coronales massives déclenchent des aurores polaires qui peuvent endommager les satellites. D'autres éruptions intenses, nommées éruptions solaires, expulsent des particules de haute énergie qui peuvent mettre en danger les astronautes et détruire l'électronique des satellites. Si nous connaissions des événements précurseurs de ces éruptions, SOHO serait un système de veille idéal.

Stationné juste devant la Terre, le satellite peut repérer les particules menaçantes avant qu'elles ne nous atteignent : son système CELIAS (pour «système d'analyse de charges, éléments, et isotopes») mesure la quantité relative d'éléments et d'isotopes rares qui n'étaient pas observés auparavant. La comparaison de ces quantités nous renseigne sur les conditions

physiques de l'atmosphère solaire, d'où provient le vent solaire. Deux autres instruments, l'analyseur COSTEP (particules suprathermiques et énergiques) et l'instrument ERNE (noyaux et électrons énergiques et relativistes), ont déjà mesuré directement les flux d'électrons, de protons et de noyaux d'hélium très énergiques approchant la Terre. L'origine de ces particules a été établie : elles proviennent d'éruptions solaires violentes détectées par l'instrument EIT. De tels événements deviendront sans doute plus nombreux lorsque l'activité solaire augmentera. SOHO suivra alors ces éruptions dès leur commencement, sous la surface visible du Soleil, jusqu'à la Terre et au reste du Système solaire.

En attendant, certains de ses instruments explorent d'autres phénomènes mystérieux. Les systèmes GOLF et VIRGO, par exemple, auront bientôt observé les oscillations solaires suffisamment longtemps, et suffisamment en profondeur, pour déterminer la température et la rotation au centre du Soleil. De surcroît, quand l'agitation interne et l'activité magnétique de notre étoile s'accroîtront, au cours des prochaines années, SOHO devrait déterminer comment naissent les éruptions menaçantes et le vent chaud et prévoir peut-être les conditions qui règnent dans l'atmosphère du Soleil.

Kenneth LANG est professeur d'astrophysique à l'Université Tufts.

Kenneth LANG, *Le Soleil et ses relations avec la Terre*, Springer-Verlag, 1997.

*The SOHO Mission*, sous la direction de Bernhard Fleck, Vicente Domingo et Arthur I. Poland, numéro spécial de *Solar Physics*, vol. 162, n° 1-2, 1995.

Elizabeth NESME-RIBES, Sallie L. BALIU-

NAS et Dmitry SOKOLOFF, *La dynamo stellaire*, in *Pour la Science*, octobre 1996.

Kenneth R. LANG, *Unsolved Mysteries of the Sun, Parts 1-2*, in *Sky and Telescope*, vol. 92, n° 2, pp. 38-42, août 1996 et vol. 92, n° 3, pp. 24-28, septembre 1996.

De nombreux liens vers le MEDOC et vers divers sites sur SOHO sont accessibles de notre site Web :

<http://www.pourlascience.com>

# Les ordinateurs configurables

JOHN VILLASENOR • WILLIAM MANGIONE-SMITH

*L'industrie de la microélectronique met au point des ordinateurs qui modifient la configuration de leurs circuits durant leur fonctionnement. Ils excellent dans la reconnaissance de formes, le traitement d'images et le chiffrement des informations.*

**L**a conception d'un ordinateur est toujours un compromis entre rapidité et polyvalence : les puces généralistes exécutent relativement lentement des tâches variées, tandis que les circuits spécialisés font très rapidement des calculs particuliers. Les microprocesseurs des ordinateurs personnels, tels le *PowerPC* de la Société *Motorola* ou le *Pentium* de la Société *Intel*, sont généralistes : des programmes binaires (0 ou 1) leur font exécuter n'importe quelle opération logique, et ils servent aussi bien au traitement de texte qu'aux jeux.

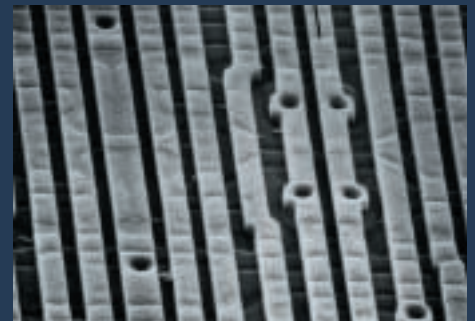
En revanche, les circuits spécialisés nommés ASIC (l'acronyme anglais d'*Application-Specific Integrated Circuit*, soit «circuit intégré spécifique») ne sont conçus que pour une tâche précise. Plus petits, plus rapides et moins onéreux que les processeurs généralistes, ils consomment en outre moins d'énergie. Un coprocesseur graphique conçu sur mesure pour un ordinateur personnel, par exemple, peut tracer des traits ou colorier des images à l'écran 10 à 100 fois plus vite qu'une unité centrale généraliste.

Lors de la création d'un ordinateur, le coût détermine souvent le choix du type de puces employées. Un circuit spécialisé bien conçu résoudra le problème pour lequel il a été construit, mais probablement pas un problème légèrement différent. En outre, si l'on crée ultérieurement un circuit modifié pour résoudre le nouveau problème, on l'intègre diffici-

lement au reste de l'ordinateur initial. Ainsi, l'effort de recherche investi dans la création d'un processeur spécialisé doit être amorti avec un petit nombre d'unités.

Aujourd'hui, une nouvelle sorte de puces allie la souplesse des puces généralistes et la puissance des circuits spécialisés : les circuits logiques configurables, ou FPGA, l'acronyme anglais de *Field-Programmable Gate Array*. Grands et rapides, ces circuits intégrés peuvent être modifiés au cours de leur utilisation. Ils sont composés de blocs logiques configurables qui effectuent les opérations fondamentales des portes logiques. Les portes logiques sont des opérateurs à plusieurs entrées et à une sortie. Ce sont elles qui exécutent les opérations binaires de base telles que ET, NON-ET, OU, NON-OU et OU EXCLUSIF. Dans la plupart des matériels informatiques utilisés aujourd'hui, les fonctions logiques des portes sont précâblées sur les circuits et ne peuvent être modifiées. En revanche, dans les circuits configurables, des signaux envoyés au circuit modifient les fonctions logiques exécutées dans les blocs logiques ainsi que les connexions entre ces blocs. Ces blocs ont la même structure que ceux qui composent les circuits spécialisés, mais on peut les connecter à volonté, lors de la programmation.

Les premiers circuits configurables ne convenaient qu'aux ingénieurs qui devaient tester rapidement plusieurs



1. CE CIRCUIT INTÉGRÉ (à droite) comporte des circuits qui peuvent se modifier en cours de fonctionnement. Les micrographies à

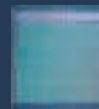


configurations, lors de la mise au point de nouveaux circuits, ou aux sociétés qui proposaient des remises à jour occasionnelles : le remaniement des connexions durait plusieurs secondes. Aujourd'hui, les circuits configurables se reconfigurent en une milliseconde, et nous estimons que ce temps sera divisé par dix d'ici deux ans. Dans le futur, on peut même envisager des équipements informatiques qui

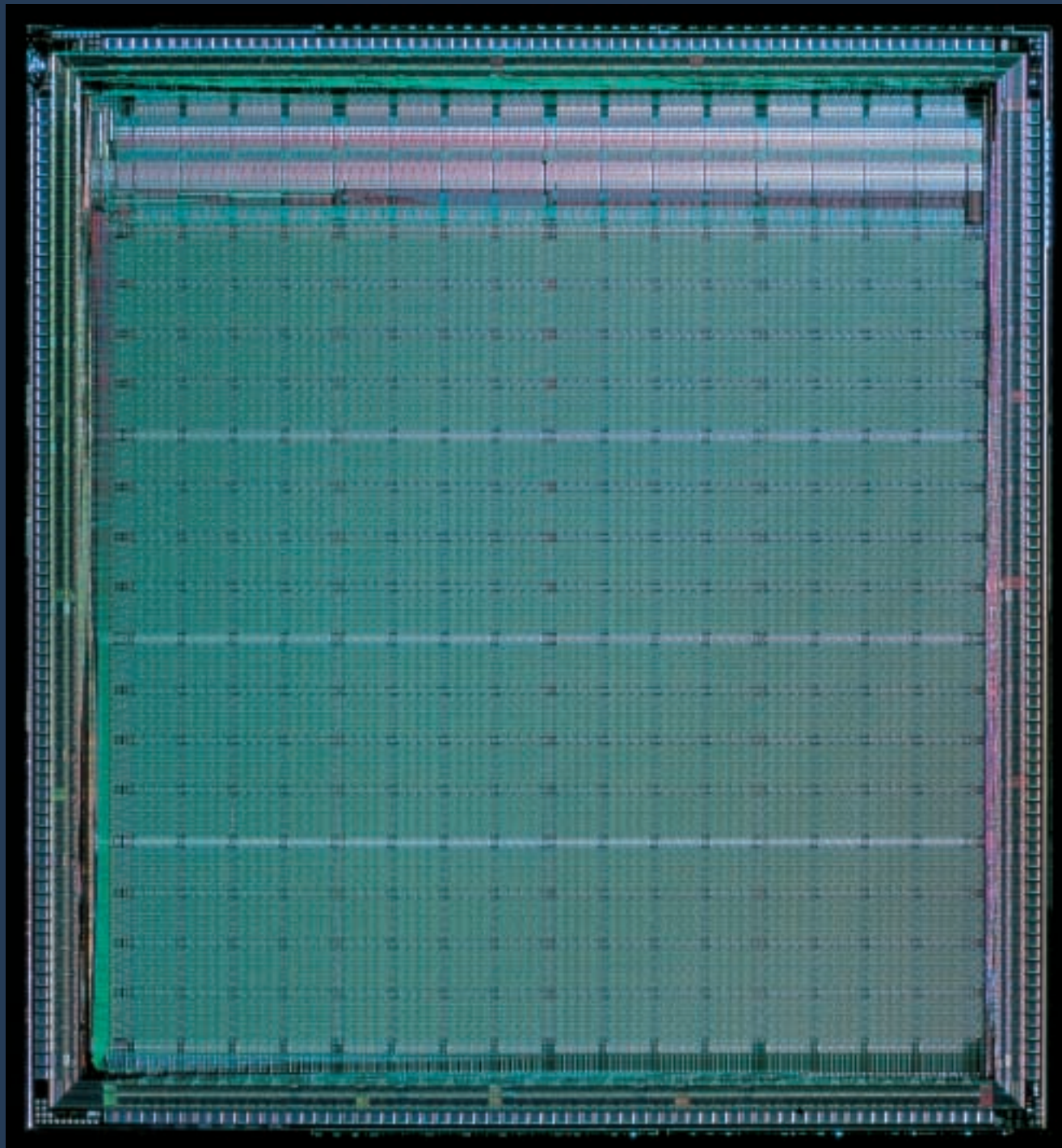
s'adapteront presque en continu selon les données d'entrée ou l'environnement de calcul.

Les divers types de processeurs configurables ont tous la même structure de base : de nombreux blocs logiques à configuration variable sont reliés par un réseau de connexions programmables. On distingue deux sortes de circuits configurables : les circuits à grosse granularité, composés d'un

petit nombre de blocs logiques puissants, et ceux à granularité fine, avec beaucoup de blocs simples. Les blocs des circuits à grosse granularité additionnent ou comparent deux nombres, des opérations déjà élaborées. En revanche, les blocs des circuits à granularité fine comparent uniquement deux nombres binaires, comme le



TAILLE RÉELLE



Xilinx

balayage électronique (à gauche) montrent trois des couches métalliques successives (de haut en bas, grossi 3 000 fois) d'une bascule bistable dans un circuit logique configurable. La bas-

cule contient quatre éléments de mémoire qui pilotent un interrupteur (zones colorées, en bas) qui assure la création de passages conducteurs dans le circuit.

font les portes logiques binaires. Les concepteurs de circuits choisissent la granularité des puces selon les applications envisagées et le temps disponible pour construire des sous-systèmes complexes.

On fait des usages variés des circuits modifiables dans les ordinateurs. Le plus simple est le changement de

fonction des circuits sur commande, l'équivalent matériel d'un changement de programme. Les reconfigurations lentes, de l'ordre de plusieurs secondes, seront sans doute acceptables pour de telles applications. Des temps de programmation plus courts autorisent la modification dynamique de circuits, c'est-à-dire l'exécution d'une série de

tâches séparées par des reconfigurations entre les tâches successives. De tels dispositifs utilisent la puce en temps partagé et basculent si vite d'une configuration à l'autre que le circuit semble exécuter toutes les fonctions en même temps.

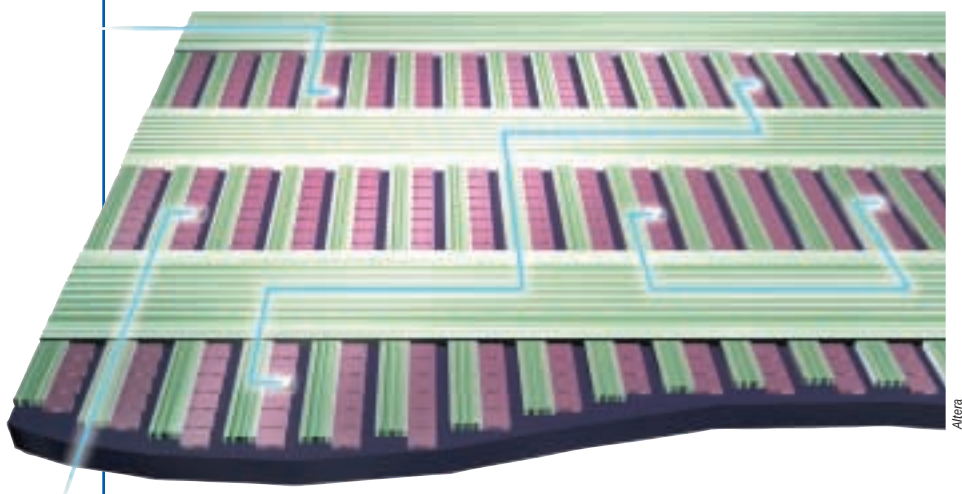
En utilisant cette approche, nous avons construit un système de transmission vidéo avec une seule puce, que l'on modifie quatre fois pour chaque image. Ainsi le circuit total est quatre fois plus petit que celui qui serait nécessaire si les puces étaient classiques. La puce configurable stocke d'abord en mémoire le signal vidéo entrant, puis elle effectue deux traitements d'image différents, et se transforme finalement en modem pour transmettre le signal.

Les circuits configurables les plus prometteurs sont ceux qui se modifient pendant l'exécution d'une tâche, en optimisant eux-mêmes leur configuration afin d'améliorer leurs performances. Ainsi, une puce de reconnaissance d'images pourrait s'automodifier selon les caractéristiques détectées : si elle détecte une voiture ou un camion, par exemple, elle déconnecte les circuits prévus pour reconnaître des avions (objets rapides) ou des personnes (au déplacement lent) et concentre sa puissance de calcul sur des véhicules terrestres. Pour certaines applications, les ordinateurs intégrant ces puces seront bien plus rapides et polyvalents que ne pourront jamais l'être les ordinateurs composés de processeurs généralistes ou spécialisés.

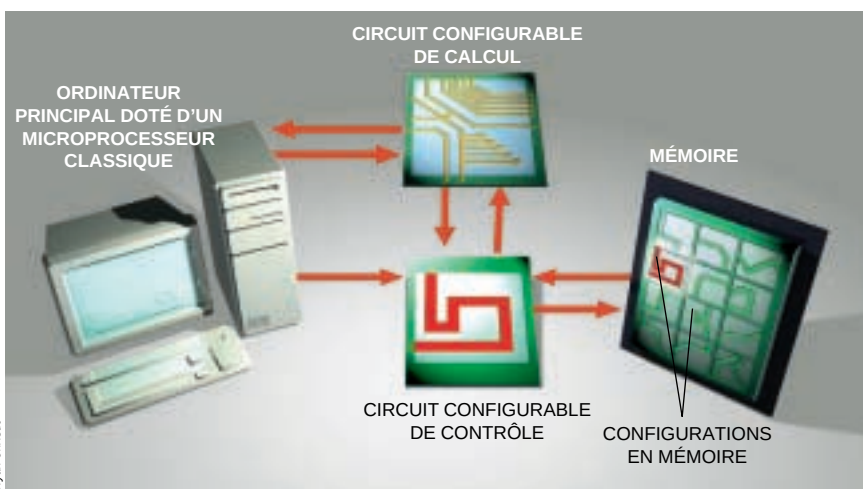
## Un circuit programmable

**O**n crée et l'on supprime des circuits (lignes bleues) dans un processeur configurable (FPGA) en envoyant des signaux électroniques à des portes logiques. Une grille de canaux de connexion disposés en colonnes et en lignes permet au concepteur de connecter un élément logique à d'autres, à une mémoire ou à un micro-

processeur externe. Les éléments logiques sont regroupés en blocs qui effectuent des opérations binaires fondamentales comme ET, OU ou NON. Plusieurs sociétés, telles Xilinx et Altera, ont mis au point des puces qui calculent aussi rapidement que des circuits classiques à 100 000 portes logiques.



Altera



Bryan Christie

**2. LES ORDINATEURS À ARCHITECTURE HYBRIDE** combinent des microprocesseurs généralistes classiques et des puces adaptables. Ainsi l'ordinateur à jeu d'instructions dynamique construit à l'Université Brigham Young contient deux circuits configurables et de la mémoire sur une carte électronique reliée à un ordinateur personnel. Le circuit configurable de contrôle charge les configurations de circuit stockées dans la mémoire vers le circuit configurable de calcul, suite aux requêtes du logiciel d'exploitation. Quand la mémoire ne contient pas un circuit demandé, le circuit de calcul envoie une requête à l'ordinateur, qui charge alors la configuration du circuit désiré.

## La reconnaissance de forme

L'une des applications les plus prometteuses des ordinateurs configurables concerne la reconnaissance de formes. Celle-ci s'utilise pour l'identification des écritures manuscrites ou des visages, l'interrogation des bases de données ou l'identification automatique de cibles. L'opération fondamentale de la reconnaissance de formes est la comparaison d'un ensemble de bits d'entrée (qui représentent une image, une chaîne de caractères ou toute autre donnée) avec un ensemble de modèles mémorisés ; le système reconnaît les données lorsque le nombre des bits d'entrée qui concordent avec les bits du modèle dépasse un seuil.

Dans le cas de l'identification de cibles – une application militaire qui motivait certains de nos premiers tra-



vaux –, on cherche à comparer rapidement l'image avec des milliers de modèles. Certains modèles représentent, par exemple, des véhicules vus de face ou de côté. Chaque image contient des milliers d'éléments (pixels), et la cible peut se trouver en n'importe quel point de l'image. Pour reconnaître des cibles assez rapidement, l'ordinateur doit effectuer plusieurs milliards d'opérations par seconde, car chaque pixel de l'image d'entrée doit être comparé à chacun des pixels des nombreux modèles.

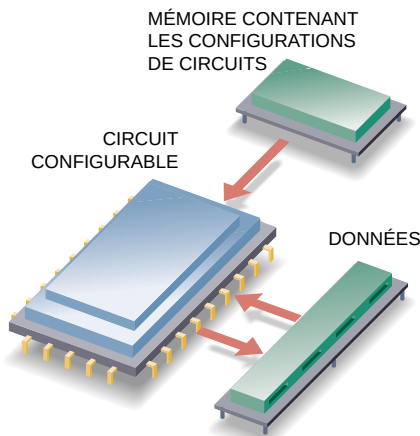
Nous avons ainsi construit un système de reconnaissance dont l'électronique modifiable permet des économies substantielles de matériel en se modifiant lors de la comparaison

avec chaque modèle : comme de nombreux pixels d'un modèle ne contribuent pas à l'identification (voir la figure 4), le circuit configurable les omet simplement lors de ses calculs. Un système classique ne peut pas alléger sa tâche de façon similaire, car les pixels à ignorer diffèrent selon les modèles. On tire encore un meilleur parti des machines configurables en programmant les circuits afin qu'ils utilisent les similarités entre les modèles. Ainsi les circuits modifiables peuvent comparer en parallèle l'image d'entrée à tout un ensemble de modèles, en n'utilisant qu'une unité de comparaison pour chaque pixel dont la valeur est la même pour les modèles de cet ensemble. Par exemple, au lieu que huit

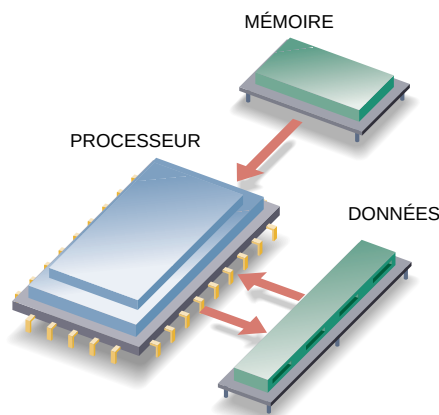
circuits distincts traitent le même pixel pour huit modèles différents, un seul circuit traite le pixel.

Récemment, nous avons mis au point un prototype de système de chiffrement utilisant de l'électronique configurable. Sur un circuit, nous avons programmé la norme de chiffrement DES (*Data Encryption Standard*), qui utilise des clés de 56 bits pour coder des blocs de données de 64 bits (en cryptographie, une clé est un nombre utilisé pour chiffrer ou déchiffrer un message confidentiel). Le chiffrement par DES procède en deux étapes : la création de sous-clés et le traitement des données. Lors de la première étape, un ensemble de rotations et de permutations de bits convertit la clé de 56 bits en une série

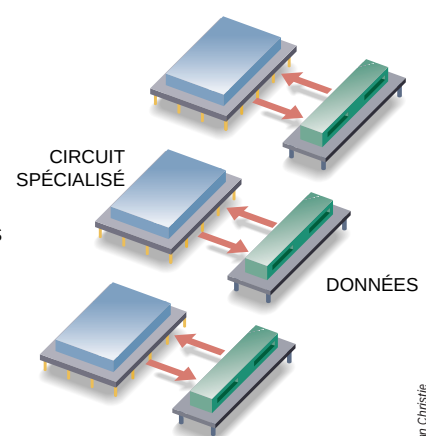
### CONFIGURABLE



### GÉNÉRALISTE



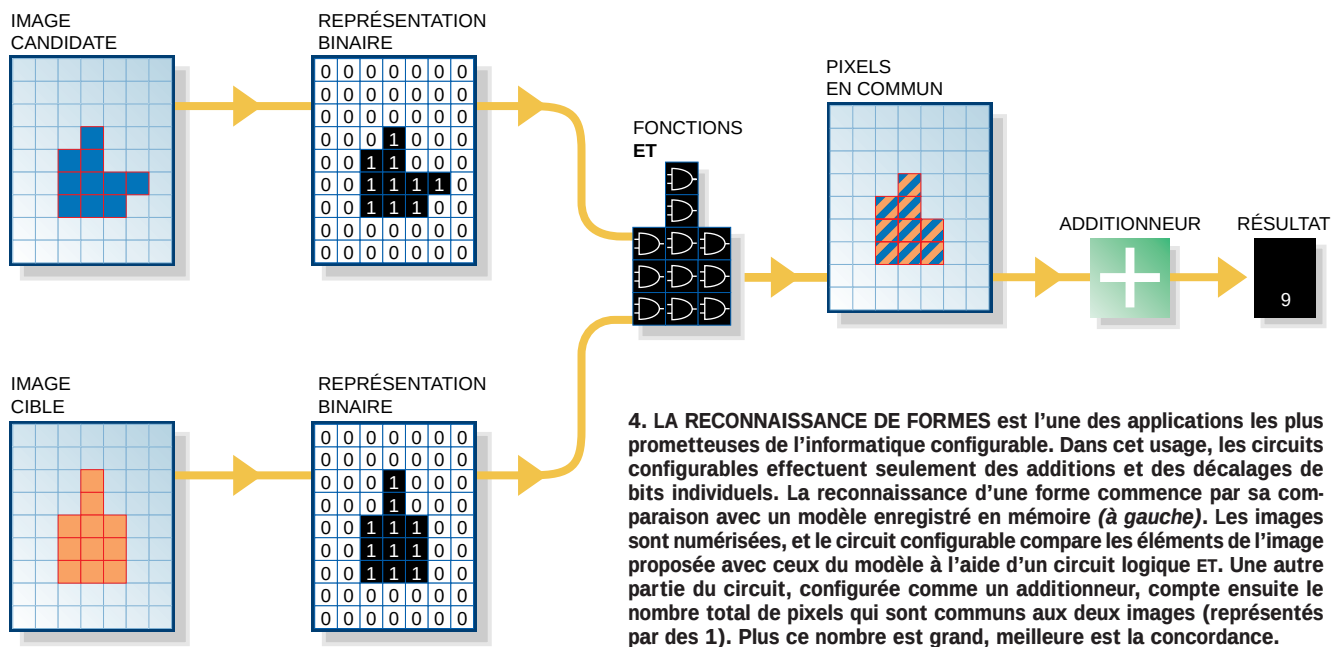
### SPÉCIALISÉ



Bryan Christie

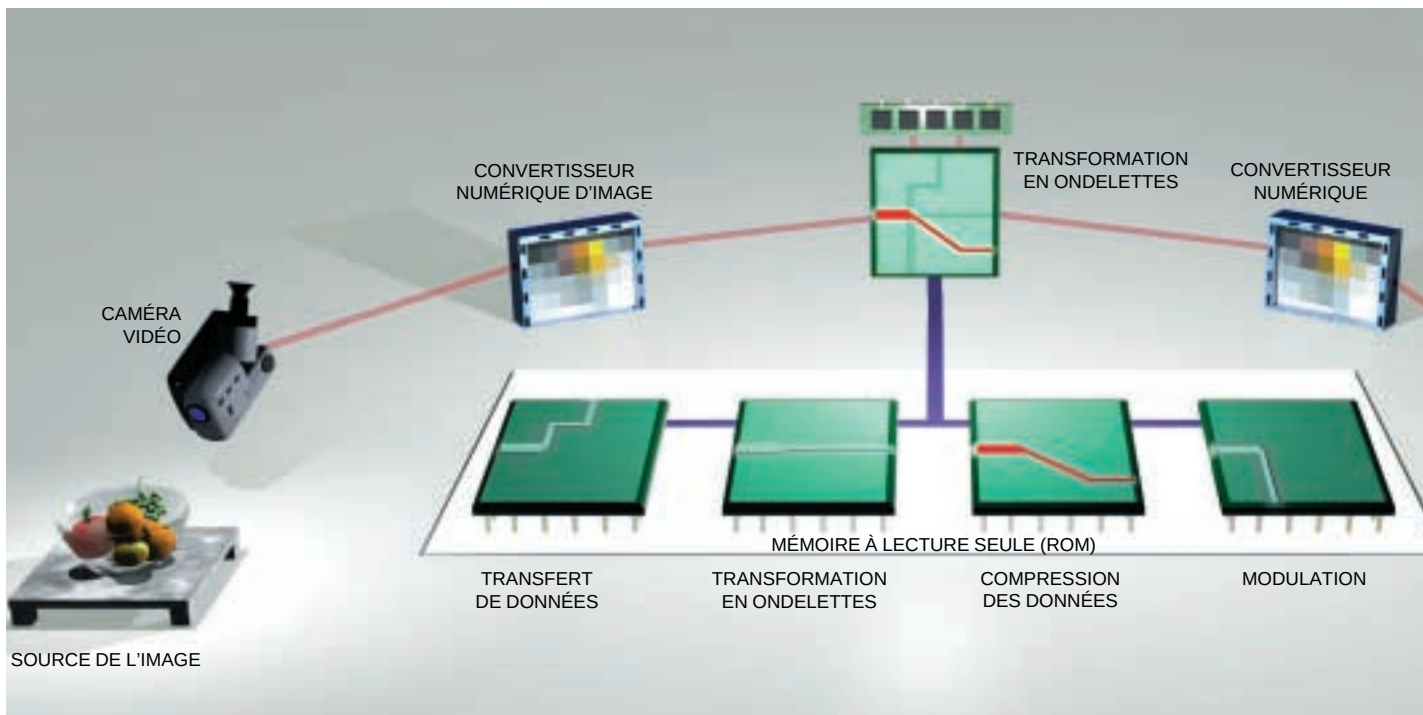
**3. LES SYSTÈMES CONFIGURABLES** combinent des éléments de calcul généraliste et de circuits spécialisés (ASIC). Les processeurs généralistes fonctionnent avec des circuits fixes qui exécutent les tâches définies par les programmes. Les processeurs

spécialisés ont des circuits qui les confinent à des tâches particulières ; la commande par programme est alors réduite. L'ordinateur configurable peut exécuter des commandes logicielles qui modifient ses circuits selon les tâches.



**4. LA RECONNAISSANCE DE FORMES** est l'une des applications les plus prometteuses de l'informatique configurable. Dans cet usage, les circuits configurables effectuent seulement des additions et des décalages de bits individuels. La reconnaissance d'une forme commence par sa comparaison avec un modèle enregistré en mémoire (à gauche). Les images sont numérisées, et le circuit configurable compare les éléments de l'image proposée avec ceux du modèle à l'aide d'un circuit logique ET. Une autre partie du circuit, configurée comme un additionneur, compte ensuite le nombre total de pixels qui sont communs aux deux images (représentés par des 1). Plus ce nombre est grand, meilleure est la concordance.

Bryan Christie



**5. CE SYSTÈME PROTOTYPE** de communication vidéo utilise un unique circuit configurable pour exécuter quatre fonctions qui sont normalement effectuées par des puces distinctes. Une puce mémoire conserve les quatre configurations utiles et les charge successivement dans le processeur configurable. Une première configuration permet d'abord au processeur adaptable d'acquérir des données

vidéo numériques. Puis la puce est rapidement configurée pour mettre l'information vidéo sous une forme comprimée, et modifiée encore pour préparer la transmission. Enfin, les circuits reçoivent la dernière configuration, qui leur permet de moduler et de transmettre l'information vidéo. Dans le récepteur, les quatre configurations sont appliquées dans l'ordre inverse de celui de

## Calcul en temps réel

**L**e concept de système configurable est né simultanément aux États-Unis et en Europe, dès l'introduction des circuits logiques configurables par la Société *Xilinx*, en 1986. Le premier système couplant un microprocesseur à des circuits reconfigurables a été conçu à l'INRIA (Institut national de recherches en informatique et en automatique) en 1987.

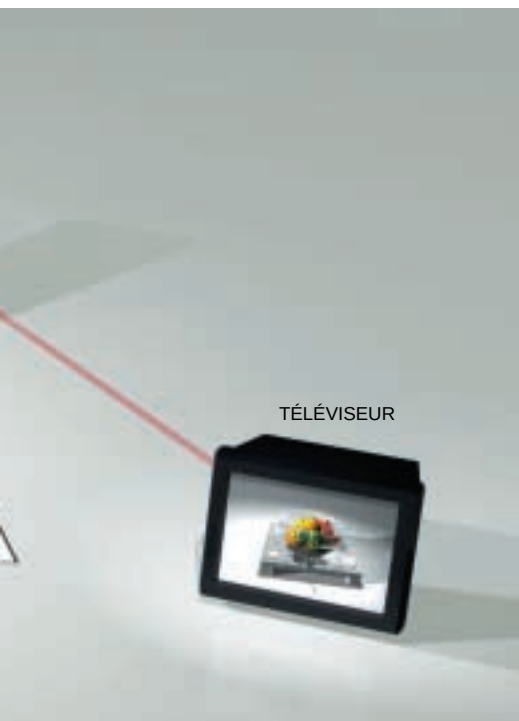
Parallèlement, des architectures similaires ont été mises en œuvre dans les « émulateurs » de logique (*QuickTurn* dès 1987, *Hewlett-Packard* plus récemment). Ceux-ci utilisent de très grandes quantités de circuits configurables (plusieurs centaines) pour simuler des circuits intégrés avant leur fabrication. Ces émulateurs de logique, devenus indispensables pour la conception des microprocesseurs modernes, n'ont cependant qu'une seule fonction : simuler de très grands circuits. En revanche, les systèmes reconfigurables proprement dits ont des fonctions aussi diverses que celles du microprocesseur, auquel ils ajoutent des fonctions spécifiques. On a ainsi le meilleur de deux mondes : universalité du logiciel et performances du matériel spécifique à chaque application.

Le système reconfigurable *DECPeRLe1*, réalisé en 1992 au Laboratoire de recherche de la Société *Digital Equipment*, à Paris, pour le prix et le volume d'une station de travail de l'époque, détient encore aujourd'hui sept records absolus de vitesse — toutes techniques confondues, du super ordinateur au circuit intégré sur mesure. Ce système

est le plus performant pour le codage et le décodage par la méthode de chiffrement à clés publiques RSA. Le même système reste le seul à répondre aux besoins d'acquisition et de filtrage de données en temps réel exprimés par le CERN pour son futur accélérateur de particules (LHC). Des performances de calcul en temps réel équivalentes à celles de ce système configurable s'obtiendraient avec un ordinateur classique au prix d'une multiplication par 100 des fréquences d'horloge les plus élevées.

**P**ar leur souplesse et le nombre de connexions potentielles (on peut faire sortir directement des centaines de fils de ces circuits), les systèmes reconfigurables sont d'excellentes interfaces entre les ordinateurs et des dispositifs externes variés. Dans le cas d'une caméra numérique à haute résolution, telle celles de l'astronomie ou de l'imagerie médicale, on y programme à la fois l'interface, le protocole de communication, et aussi les fonctions de filtrage de l'image et l'adaptation du débit des données reçues par l'ordinateur hôte. On obtient ainsi un système d'acquisition optimal, qui peut s'adapter aux évolutions des caméras ou aux besoins d'acquisition par simple reconfiguration. C'est à travers des applications de ce type que les systèmes reconfigurables sont aujourd'hui passés du stade de la recherche à celui de produits industriels.

Jean VUILLEMIN, École normale supérieure  
Patrice BERTIN, École des mines de Paris



Bryan Christie

départ. Ainsi le circuit démodule les données, décompresse l'image, puis l'envoie à un convertisseur numérique-analogique afin d'afficher l'image sur un écran. Notre système est capable de traiter huit images par seconde.

de 16 sous-clés. Lors de la seconde étape, chaque sous-clé traite ensuite les données séparément : l'ensemble des 16 sous-clés chiffre ou déchiffre chaque bloc de 64 bits. Lorsqu'un ordinateur est simultanément utilisé par plusieurs personnes, chaque paire d'utilisateurs utilise une clé distincte, et le système de chiffrement doit changer de clé chaque fois que des parties de messages arrivent des différents utilisateurs.

Toutefois, la clé cryptographique reste constante pendant qu'un long bloc de données transite sur le réseau. Par exemple, si deux personnes communiquent à travers un réseau protégé, ils échangent une seule fois une clé cryptographique protégée, puis utilisent cette clé tout au long de leur dialogue afin d'engendrer les sous-clés pour chaque session de chiffrement ou déchiffrement.

Avec une puce configurable, le logiciel calcule les valeurs des sous-clés une fois pour toutes, et le circuit de traitement de données peut être optimisé pour ces sous-clés spécifiques. Ainsi peut-on éviter de consacrer une partie de la puce au calcul des sous-clés. Ces économies nous ont permis d'installer l'algorithme DES sur un circuit adaptable comprenant 13 000 portes logiques au lieu des 25 000 portes nécessaires

avec des circuits classiques. Lorsque la clé de chiffrement doit être changée, l'utilisateur peut rapidement calculer la configuration nécessaire pour la nouvelle sous-clé, puis reconfigurer la puce pour la suite du calcul.

Les prototypes que nous avons mis au point pour l'identification de cibles et le chiffrement démontrent que les circuits configurables conduisent à des ordinateurs puissants. De nombreuses autres applications, tels les communications numériques, le traitement des données radar et la conception assistée par ordinateur, tireraient parti de telles puces.

## Le futur de l'informatique configurable

L'informatique configurable est un domaine très jeune : bien que Gerald Estrin, de l'Université de Los Angeles, en ait établi les principes dès la fin des années 1960, les premiers essais datent de quelques années seulement. De plus, les circuits configurables actuels, avec au mieux 100 000 portes logiques, n'exploitent pas toutes les possibilités de cette technique. Les futurs circuits seront bien plus grands : comme pour la plupart des circuits intégrés classiques, le nombre d'éléments intégrés sur un circuit adaptable double tous les 18 mois environ. Ainsi, avant la fin de cette décennie, les circuits adaptables comprendront probablement un million d'éléments logiques.

Les chercheurs et les industriels résolvent aujourd'hui les problèmes de conception qui ont retardé l'adoption de l'informatique configurable. Les circuits configurables actuels ne sont utilisables qu'avec des algorithmes opérant sur les bits individuels, tels que la comparaison de formes et l'arithmétique des nombres entiers, mais ils sont mal adaptés aux opérations numériques telles que la multiplication de haute précision ou les calculs en virgule flottante. Des circuits multiplicateurs spécialisés, comme ceux utilisés dans les microprocesseurs et dans les processeurs de traitement numérique du signal (DSP), peuvent être optimisés pour fonctionner plus efficacement que les circuits multiplicateurs réalisés à partir de logique configurable. De surcroît, la mémoire intégrée des circuits configurables, nécessaire pour le stockage des résultats intermédiaires, reste trop faible. Ainsi, de nombreux programmes nécessitent une impor-

tante mémoire externe pour fonctionner avec des circuits modifiables : le transfert des données entre le circuit et la mémoire ralentit les calculs et consomme plus d'énergie (la consommation d'énergie est gênante, parce qu'elle s'accompagne d'une dissipation de chaleur nuisible au bon fonctionnement des circuits).

Pour éviter ces écueils, les électroniciens et les informaticiens mettent au point les premiers circuits configurables à mémoire intégrée. À l'Institut de technologie du Massachusetts, André DeHon et Thomas Knight ont proposé un circuit qui stocke les données des multiples configurations dans une mémoire intégrée. En un seul cycle d'horloge, soit quelques dizaines ou centaines de nanosecondes, la puce bascule d'une configuration à une autre, sans effacer les données partiellement traitées.

Parallèlement, Brad Hutchings, de l'Université Brigham Young, a utilisé l'informatique configurable pour construire un ordinateur à jeu d'instruction dynamique. Ce système, qui allie un microprocesseur classique et un coprocesseur configurable, démontre le potentiel de la reconfiguration automatique utilisant des configurations mémorisées. Lors de l'exécution du programme, le circuit demande une reconfiguration chaque fois qu'il détecte l'absence d'un circuit spécifique nécessaire au calcul. On peut ainsi créer et mémoriser un grand nombre de configurations de circuit, et les activer de la même façon qu'un programmeur appelle un sous-programme.

Le groupe *Colt*, dirigé par Peter Athanas, de l'Institut polytechnique de Virginie, étudie une technique de reconfiguration durant l'exécution nommée *Wormhole* («trou de ver»), qui

se prête à l'informatique répartie. Un flot de données crée une logique dédiée à mesure qu'il traverse les circuits configurables.

John Wawrzynek et ses collègues de l'Université de Berkeley étudient des systèmes qui combinent un microprocesseur et un processeur configurable. À partir d'un programme ordinaire, un logiciel de compilation spécial engendre une combinaison d'instructions-machine et de configurations du processeur configurable qui accélèrent l'exécution du programme.

Les processeurs configurables ne remplaceront jamais les microprocesseurs pour les tâches généralistes, mais les circuits à configurations variables joueront certainement un rôle croissant dans la mise au point de systèmes informatiques performants. La puissance de calcul des processeurs configurables en fait des systèmes de choix chaque fois qu'une adaptation rapide aux données est requise.

Progressivement, la frontière entre processeurs programmables et processeurs configurables s'estompera : les circuits configurables comprendront une mémoire interne augmentée et des multiplicateurs spécialisés, comme les microprocesseurs classiques ; inversement, les microprocesseurs de la prochaine génération pourront modifier dynamiquement certaines parties de leur circuit, un peu comme les processeurs configurables. De la même manière que les ordinateurs reliés au réseau Internet peuvent télécharger des logiciels spécialisés pour effectuer des tâches particulières, les futures machines pourront charger de nouvelles configurations de circuits. Dans dix ans, les ordinateurs comprendront un mélange de puces programmables et de puces configurables.

---

John VILLASENOR et William MANGIONE-SMITH travaillent au Département d'ingénierie électrique de l'Université de Los Angeles.

M.J. WIRTHLIN et B.L. HUTCHINGS, *A Dynamic Instruction Set Computer*, in *Proceedings of the IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machine*, avril 1995, IEEE Computer Society Press, 1995.

J. VUILLEMIN, P. BERTIN, D. RONCIN, M. SHAND, H. TOUATI et P. BOUCARD, *Programmable Active Memories : The Coming of Age*, in *IEEE Trans. on VLSI*, vol. 4, pp. 56-69, mars 1996.

---

John VILLASENOR, Brian SCHONER, Kang-Ngee CHIA, Charles ZAPATA, Hea Joung KIM, Chris JONES, Shane LANSING et Bill MANGIONE-SMITH, *Configurable Computing Solutions for Automatic Target Recognition*, in *4th IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines (FCCM '96)* April 1996.

Ray BITTNER et Peter ATHANAS, *Wormhole Run-Time Reconfiguration*, in *FPGA '97 : ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays*, Special Interest Group on Design Automation (SIGDA), ACM, 1997.

---



