

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.

Les tombes impériales de la dynastie Tang

ALEXANDER KOCH

Des archéologues allemands et chinois étudient les mausolées imposants des souverains de la plus grande époque de la Chine impériale.

Ils se préoccupent également de préserver ces monuments quasi inconnus.

Plus de 1 000 ans après la mort de l'empereur, on voit encore le dernier chemin qu'il emprunta : montant vers le Nord à partir de la plaine, le chemin de l'âme conduit vers le massif montagneux qui se profile à l'horizon. Sur plusieurs centaines de mètres, de part et d'autre de cette voie, des statues en pierre représentent des créatures fabuleuses, des chevaux et des hommes plus grands que nature ; des tours, des piliers et des stèles commémoratives sont couverts d'inscriptions. Après avoir franchi la porte fortifiée, taillée dans la haute muraille qui ceignait le massif montagneux sur des kilomètres, le visiteur du VIII^e siècle arrivait dans la zone funéraire proprement dite, une vaste étendue aménagée au-dessus du tombeau creusé dans la montagne, qui avait été agencée et dotée d'un réseau de chemins (voir la figure 1).

Celui qui atteignait ainsi le début de la route de la soie, en Chine centrale, pouvait croire que le mausolée d'un empereur Tang était une ville. C'était le but visé : après sa mort, l'empereur devait jouir du même faste, du même confort, des mêmes honneurs que de son vivant.

Depuis 1993, avec nos collègues de l'Institut d'archéologie de la province du Shaanxi, nous recensons et analysons ces complexes funéraires de l'époque la plus florissante d'une des plus grandes civilisations de l'humanité. Il reste peu de bâtiments et d'ouvrages d'art de la dynastie des Tang, qui régnèrent de 618 à 907. Lors de cet «Âge d'or», la Chine était le pays le plus vaste et le plus peuplé de la surface du Globe, et

il s'étendait loin en Asie centrale : l'élan culturel et économique fut inégalé. Le premier siècle de la dynastie Tang bénéficia d'une politique militaire active, d'une diplomatie habile et de réformes économiques et sociales. La puissance et la stabilité de cet énorme État s'accompagnèrent de la paix intérieure et de l'ouverture du pays aux influences, aux religions, aux modes de vie et aux courants artistiques étrangers : l'État tolérait les religions telles que le bouddhisme, le christianisme nestorien, le judaïsme, l'islam, le mazdéisme (zoroastrisme) et le manichéisme. Des influences provenant de toute l'Asie se mêlaient dans le creuset chinois. Les échanges avec les pays étrangers contribuèrent au développement intérieur.

L'ouverture vers le monde extérieur laissa une profonde empreinte sur la ville de Chang'an, aujourd'hui nommée Xi'an : avec ses deux millions d'habitants, c'était certainement la métropole la plus importante et la plus animée de son temps, facile à défendre grâce aux montagnes qui l'entouraient. C'est de cette ville, située au milieu des plaines d'altitude fertiles du Guanzhong, «l'intérieur des passes», que partaient vers l'Ouest les fameuses caravanes. Centre cosmopolite, Chang'an accueillait nombre de marchands, artisans, artistes, diplomates, missionnaires et réfugiés politiques, qui se regroupaient en communautés.

À ce jour, le trésor culturel qui s'est accumulé pendant plusieurs millénaires, dans cette région située en plein cœur de la Chine, reste en grande partie inconnu, mais des surprises attendent les archéologues. Ainsi, en 1974,

près de Lintong, à 35 kilomètres à l'Est de Xi'an, une découverte a ébloui le monde entier : sous l'immense colonne funéraire se dressait une armée forte de plusieurs milliers de soldats en terre cuite, presque grandeur nature, avec chevaux et chariots. Cette armée devait protéger dans l'au-delà celui que l'on nomme le premier empereur de Chine, Qin Shihuangdi, qui régna de 221 à 210 avant notre ère.

Cette découverte fut le début d'une nouvelle ère pour l'archéologie chinoise : depuis, les trouvailles se sont multipliées, surtout au Shaanxi, où s'est manifestée la grandeur passée de l'empire. De la dynastie Tang, qui correspond au début du Moyen Âge en Europe, on a ainsi trouvé les restes de palais impériaux, de temples et de nécropoles de dimensions souvent colossales et d'une richesse difficilement imaginable.

Comment recenser, conserver et étudier ces monuments, ainsi que les autres trouvailles archéologiques ? L'accord germano-chinois de coopération culturelle et technique a donné les moyens archéologiques nécessaires : en 1990, le Musée de Mayence et l'Institut d'archéologie de Xi'an ont passé un contrat pour mettre au point des procédés de conservation et de restauration.

Les ateliers de restauration de Xi'an

L'atelier de restauration qui est aujourd'hui installé à l'Institut d'archéologie de Xi'an dispose de huit à dix postes de travail équipés d'outillage apporté d'Allemagne : une installation de radio-