© Pour la Science - n° 452 - Juin 2015

Mémordinateurs
quand l'informatique s'inspire du cerveau

Massimiliano Di Ventra et Yuriy Pershin

Un peu comme les neurones, de nouveaux composants électroniques traitent l'information et la stockent eux-mêmes. Ils ouvrent la voie à une informatique plus efficace et plus rapide.

Pour écrire les mots que vous êtes en train de lire, nous en avons tapé chaque lettre sur le clavier d'un ordinateur. Même s'ils sont à la pointe de la technologie, les ordinateurs sont des machines peu optimisées : ils gaspillent de l'énergie et sont lents dès qu'il s'agit de faire des calculs scientifiques complexes et nombreux. Tous les appareils électroniques actuels souffrent de ces mêmes défauts, depuis le smartphone qui tient dans la main jusqu'aux très coûteux superordinateurs qui ronronnent dans les centres de calcul les plus performants du monde.

Nous avons utilisé un logiciel de traitement de texte, Word, pour écrire ce texte. Quand nous tapons sur le clavier, ce que nous ne percevons pas est que l'ordinateur a transféré un ensemble de 0 et de 1 (la forme que prend un document Word pour être manipulé par la machine) d'une zone de mémoire temporaire à un autre lieu physique, le processeur. Et ce dernier interprète ces données afin d'afficher les lettres à l'écran. Enfin, pour empêcher le texte de s'effacer quand on éteint l'ordinateur, les données qui le représentaient ont migré de nouveau vers une zone de mémoire plus stable, en l'occurrence le disque dur.

Cette valse à deux temps est inévitable, car la mémoire informatique est incapable de traiter l'information et les processeurs sont incapables de faire office de mémoire. Cette répartition du travail et les transferts permanents de données constituent un obstacle à la réduction du temps de traitement des opérations et de l'énergie consommée.

Pour améliorer les performances des machines, les chercheurs développent aujourd'hui un moyen de combiner ce qui était auparavant impossible à associer : ils créent des circuits qui, simultanément, effectuent des opérations et stockent les données. Cela implique de remplacer les éléments de circuit classiques que sont les transistors, les condensateurs et les inducteurs par de nouveaux composants : des mémristors, des mémcapacités et des méminductances. Ces éléments existent déjà dans des versions expérimentales et seront bientôt combinés pour former un nouveau type de machine : un mémordinateur.

L'ESSENTIEL

- **Les ordinateurs actuels ont tous un processeur qui effectue les calculs et une unité de mémoire séparée qui contient les programmes.**
- **Les échanges d'information entre ces éléments consomment de l'énergie et du temps.**
- **Un nouveau concept, la méminformatique, s'inspire des neurones du cerveau humain, qui sont à la fois des unités de calcul et de stockage.**
- **Sur ce principe, les chercheurs développent de nouveaux composants et l'architecture informatique nécessaire pour les utiliser.**

Adam Simpson

Les mémordinateurs surpasseront en vitesse les ordinateurs classiques, car chaque élément d'un mémordinateur contribuera à calculer la réponse à un problème et en stockera le résultat sans perdre de temps et d'énergie à déplacer les informations d'une zone de l'ordinateur à une autre. Cette nouvelle architecture informatique modifiera le fonctionnement de tous les ordinateurs, depuis les minuscules puces des téléphones portables jusqu'aux énormes supercalculateurs. Ces nouveaux composants se rapprochent du fonctionnement des neurones du cerveau humain, qui emmagasinent des souvenirs et traitent l'information.

Plus rapides (ne mettant que quelques secondes à faire des calculs qui prendraient des décennies aux ordinateurs actuels), plus petits et plus économes en électricité, les mémordinateurs offrent des perspectives intéressantes. Bien qu'aucune machine complète de ce type n'ait encore été construite, les scientifiques expérimentent déjà les différents composants qui les constitueront.

Il suffit d'une minuscule quantité d'électricité et d'une fraction de seconde pour déplacer un volume de données équivalent à notre texte dans une machine. Mais si vous réfléchissez à ce qui se passe à l'échelle mondiale de l'utilisation des ordinateurs, le temps perdu dans ces échanges d'information entre les processeurs et les mémoires doit être multiplié par un facteur immense et la facture électrique devrait être tout aussi lourde.

Entre 2011 et 2012, les besoins en électricité pour les centres de données informatiques du monde entier ont augmenté de 58 %. Et il n'y a pas que les superordinateurs : il faut rajouter les objets du quotidien – des fours aux ordinateurs portables en passant par les téléviseurs –, qui sont désormais tous dotés de capacités de calcul. Les secteurs de l'information et de la communication représentent environ 15 % de la consommation globale d'électricité. D'ici 2030, l'électronique grand public consommera autant d'électricité que la consommation totale d'électricité des foyers américains et japonais aujourd'hui ; et la facture s'élèvera à près de 200 milliards d'euros par an. À l'heure où nous tentons de réduire notre consommation électrique, cette augmentation des besoins en électricité des ordinateurs pose problème.

Une solution serait de réduire la taille des composants électroniques, en particulier des transistors, afin de diminuer la distance qui sépare les processeurs des mémoires. Cette stratégie est cependant une impasse : les experts qui ont participé au Plan international pour la technologie des semi-conducteurs *(International Technology Roadmap for Semiconductors)* ont estimé que l'industrie du transistor se heurtera à une limite technique d'ici 2016, car des difficultés physiques émergeront, telles des fuites de courant électrique de nature quantique.

Nous serions donc confrontés à un grave obstacle pour continuer à satisfaire nos besoins toujours croissants en termes de puissance de calcul, aussi bien pour les dispositifs grand public que pour la recherche. En effet, des domaines tels que la météorologie, la climatologie ou la génomique nécessitent d'exploiter des bases de données gigantesques avec des calculs longs et complexes.

Les mémordinateurs, en évitant les transferts de données coûteux en temps et en électricité entre le processeur et la mémoire, économiseront des quantités considérables d'énergie. Or traiter l'information et la stocker au même endroit, c'est exactement ce que fait le cerveau humain. La méminformatique s'inspire de cet organe rapide et efficace. Le cerveau humain moyen est capable d'effectuer environ 10 millions de milliards d'opérations par seconde, et ne consomme pour ce faire que 10 à 25 watts. Un ordinateur aurait besoin d'une puissance plus de 10 millions de fois supérieure pour atteindre les mêmes capacités de calcul !

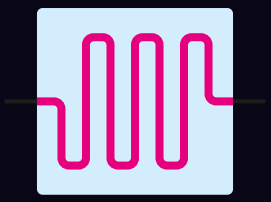
Rivaliser avec le cerveau

En outre, les ordinateurs réussissent moins bien certaines tâches complexes telles que la reconnaissance de motifs, par exemple séparer le son d'un aboiement de chien du son d'une voiture qui passe dans la rue, opération que nous faisons tout le temps dans les environnements bruyants et imprévisibles dans lesquels nous vivons.

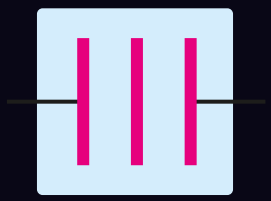
Contrairement à nos ordinateurs actuels, le traitement de l'information et son stockage ne sont pas effectués en deux endroits différents : ce sont les mêmes neurones et synapses de notre cerveau qui s'en chargent. Les ordinateurs reposent sur une séparation spatiale des tâches pour éviter que les programmes et les données n'interfèrent et provoquent des erreurs. Cela pourrait être évité si les éléments du circuit d'un processeur pouvaient « se souvenir » de la dernière chose qu'ils ont

Les trois éléments essentiels de la méminformatique

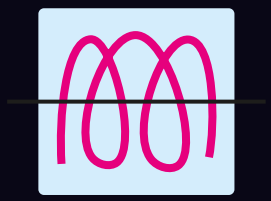
Les circuits électriques actuels utilisent trois composants essentiels. Les résistances entravent le courant électrique qui les traverse, les condensateurs stockent des charges électriques et les inducteurs convertissent le courant en champ magnétique. Quand on coupe le courant, les composants reprennent leur état d'origine. Les versions méminformatiques de ces composants conservent leur état modifié.



MÉMRISTOR
Ce dispositif change de résistance en fonction de la charge électrique qui le traverse, et il conserve ce changement, agissant ainsi comme une mémoire.



MÉMCAPACITÉ
Ce dispositif stocke les charges électriques, mais il modifie aussi son état, c'est-à-dire sa capacitance, en fonction des tensions qui lui ont été appliquées.



MÉMINDUCTANCE
Comme un mémristor, ce dispositif est traversé par le courant, mais il stocke de l'énergie comme une mémcapacité.

© Pour la Science - n° 452 - Juin 2015

faite, même une fois coupé le courant. Les données resteraient intactes.

C'est exactement ce que font les composants méminformatiques : traiter l'information et la conserver en mémoire même après coupure de l'électricité. L'un de ces nouveaux dispositifs est le mémristor. Pour comprendre son fonctionnement, imaginez un tuyau dont le diamètre change selon le sens de l'écoulement. Quand l'eau s'écoule de droite à gauche, le tuyau s'élargit, ce qui permet à davantage d'eau de passer. Quand l'eau circule de gauche à droite, le tuyau rétrécit, et il s'écoule moins d'eau. Si on coupe l'eau, le tuyau maintient son diamètre : il « se souvient » de la quantité d'eau qu'il laissait passer.

Une résistance avec de la mémoire

Remplacez maintenant l'eau par un courant électrique et le tuyau par un mémristor. Ce dernier change de résistance selon l'intensité du courant qui y circule, de la même manière que le tuyau d'eau change de diamètre : un tuyau large offre moins de résistance à l'écoulement qu'un tuyau plus étroit. Si vous vous représentez la résistance comme un nombre (une donnée) et la variation de la résistance comme une opération de calcul, un mémristor est un élément de circuit capable de traiter l'information, puis de la retenir. Les mémristors regroupent les tâches du processeur et de la mémoire en un seul et même endroit *(voir la figure page 42)*.

La notion de mémristor a été introduite dans les années 1970 par Leon Chua, un ingénieur en électricité de l'Université de Californie à Berkeley. À cette époque, sa théorie semblait difficile à mettre en pratique. Les matériaux utilisés dans les circuits ne conservaient pas la mémoire de leur dernier état comme le tuyau d'eau imaginaire, et l'idée paraissait irréaliste. Mais au fil des décennies, les ingénieurs et les physiciens des matériaux ont réussi à mieux contrôler les composants des circuits qu'ils fabriquaient, les dotant de nouvelles propriétés.

En 2008, l'ingénieur Stanley Williams de la société Hewlett-Packard et ses collègues

■ LES AUTEURS

Massimiliano DI VENTRA
est professeur au département de physique de l'Université de Californie à San Diego.

Yuriy PERSHIN
est maître de conférences au département de physique et d'astronomie de l'Université de Caroline du Sud.

Imiter les synapses du cerveau avec des mémristors

Les mémristors ne serviront pas uniquement à construire des mémordinateurs. Grâce à leurs propriétés uniques, ces composants ont un fonctionnement similaire à celui des synapses du cerveau, de quoi imaginer la possibilité de construire des synapses artificielles.

Les synapses laissent plus ou moins bien passer les signaux entre les neurones en fonction de l'activité électrique de ces derniers. De la même façon, lorsqu'on applique une tension à un mémristor, sa résistance électrique varie, laissant passer plus ou moins de courant.

Si l'on coupe la tension, la résistance se fixe à sa dernière valeur. Cette propriété imite la mémoire des synapses.

Le cerveau contient quelque 86 milliards de neurones et 10 000 fois plus de synapses. Aujourd'hui, la plupart des puces bio-inspirées sont réalisées en assemblant des transistors, mais il en faut des dizaines pour imiter un neurone ou une synapse. Cela rend difficile la construction d'un réseau complexe de neurones artificiels.

Comme un mémristor simule une synapse, ce composant offre la possibilité de construire des réseaux de neurones à l'échelle nanométrique.

Mais avant de construire ces réseaux, il faut choisir le type de mémristor utilisé. En effet, il en existe plusieurs types. On peut utiliser divers matériaux ainsi qu'une variété de phénomènes physiques pour réaliser ces composants. De façon générale, pour obtenir de fortes variations de résistance en appliquant une tension aux bornes d'un composant, il est tentant d'utiliser des phénomènes qui affectent l'intégrité du composant : échauffement, mouvements d'ions ou d'atomes, etc. Ces mémristors fonctionnent bien, mais on peut craindre qu'ils se dégradent rapidement si leur structure interne est affectée à chaque fois qu'ils mémorisent quelque chose.

À l'Unité mixte de physique CNRS/Thales à Palaiseau, nous explorons une autre piste. Dans nos composants, les variations de résistance sont dues à des effets fins aux interfaces de multicouches nanométriques de type métal/isolant/métal, ce qui n'affecte pas les matériaux utilisés. Nous avons développé deux concepts de mémristors. L'un d'eux est le mémristor magnétique, où les variations de résistance sont dues au renversement des pôles des nano-aimants, telle la magnétorésistance géante découverte par le physicien Albert Fert.

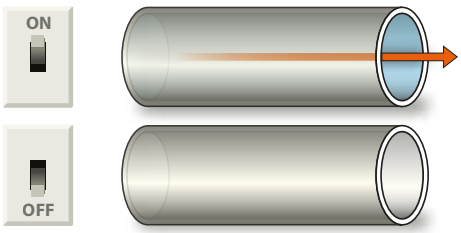
L'autre mémristor a un fonctionnement similaire, mais c'est le phénomène de ferroélectricité (où le matériau a une polarisation électrique) que nous exploitons à la place du magnétisme. En plus d'être robustes, nos dispositifs sont ultrarapides, et commutent en moins de dix nanosecondes, un million de fois plus rapidement que les synapses biologiques.

Il reste encore à fabriquer ces mémristors en grand nombre et à les connecter à des neurones artificiels (composés de transistors CMOS). Nous collaborons à cette fin avec les laboratoires de TRT (Thales Research & Technology) et le laboratoire de l'Intégration du matériau au système à Bordeaux. Mais nous nous attelons déjà à une nouvelle piste : concevoir et fabriquer des nanoneurones...

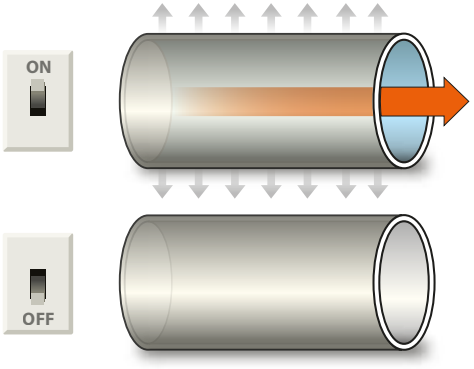
– Julie Grollier
Unité mixte de physique CNRS/Thales, Palaiseau

UNE RÉSISTANCE DOTÉE DE MÉMOIRE

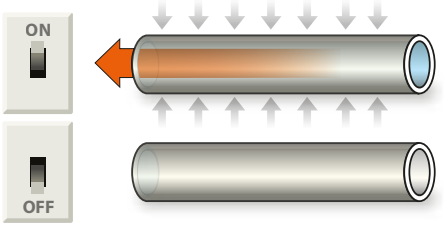
Pour l'un des nouveaux composants de la méminformatique, le mémristor, la valeur de la résistance change en fonction du courant électrique qui l'a traversé, ce qui est une façon de traiter l'information. De plus, il conserve ce changement, ce qui en fait un composant doté d'une fonction de mémorisation de l'information.



Résistance modérée
Dans la configuration de base, un mémristor présente une résistance moyenne au courant qui le traverse, résistance représentée ici par le diamètre du tube. La résistance est interprétable comme un nombre par l'ordinateur, ce qui peut être utilisé dans un calcul. Quand on coupe le courant, le tube conserve le même diamètre.



Résistance faible
Quand le courant est intense, la résistance du mémristor diminue, ce qui est représenté ici par un élargissement du tube. Cette variation de la résistance revient à un traitement de l'information. Quand le courant est coupé, le mémristor conserve son état, agissant ainsi comme une mémoire. Un composant classique retrouverait son état d'origine.



Résistance élevée
La résistance d'un mémristor peut également augmenter si on inverse le sens du courant électrique, ce qui est représenté par un rétrécissement du tube. Là encore, la fonction de mémoire s'ajoute au traitement de l'information : le composant ne reprend pas son état d'origine quand on coupe le courant.

Jen Christiansen

ont produit des éléments de mémoire qui pouvaient changer de résistance et conserver leur état modifié. Ils ont façonné du dioxyde de titane en composants électriques mesurant quelques dizaines de nanomètres (des millionièmes de mètre) seulement. Le courant, appliqué à des dispositifs aussi petits, a un effet qui n'avait pas été observé sur des dispositifs plus gros. Les chercheurs ont montré que le composant conservait un état qui était déterminé par l'historique du courant qui l'avait traversé. Le tuyau imaginaire existe bel et bien !

Ces dispositifs peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux, avec des diamètres de quelques nanomètres seulement. Des dimensions réduites signifient que l'on peut faire tenir beaucoup de composants par unité de surface, et que l'on peut donc les intégrer à presque tous les types d'appareils. Par ailleurs, nombre de ces composants peuvent être fabriqués dans les mêmes usines de semi-conducteurs que celles où sont produits les composants électroniques actuels.

Des composants bon marché

Un autre composant clef susceptible d'être utilisé en méminformatique est la mémcapacité. Les condensateurs classiques sont des dispositifs qui stockent des charges électriques, mais leur capacité ne change pas, quel que soit le nombre de charges déposées dedans. Dans les ordinateurs d'aujourd'hui, on les utilise principalement dans un type particulier de mémoires, les mémoires vives dynamiques (DRAM pour *Dynamic Random Access Memory*), où les programmes informatiques sont enregistrés de façon à être rapidement chargés par le processeur dès qu'il en a besoin.

Une mémcapacité stocke non seulement les charges, mais modifie sa capacité en fonction de la tension qui lui est appliquée. Cela lui confère à la fois des capacités de mémoire et de traitement. De plus, les mémcapacités stockent des charges, donc de l'énergie, qui est réutilisée pendant le calcul, ce qui contribue à réduire la consommation électrique globale de la machine.

Certains types de mémcapacités, composés de matériaux ferroélectriques relativement onéreux, sont disponibles sur le marché et sont utilisés comme dispositifs de stockage de données. Mais les

© Pour la Science - n° 452 - Juin 2015

laboratoires de recherche en développent des versions faites à partir de silicium bon marché, ce qui maintiendrait un coût assez bas pour les utiliser dans l'ensemble d'un ordinateur.

La méminductance est le troisième élément de la méminformatique. Ce composant stocke de l'énergie comme une mémcapacité, tout en laissant le courant le traverser comme un mémristor. Des méminductances ont déjà été fabriquées, mais elles étaient d'assez grande taille parce qu'elles reposaient sur des bobines magnétiques. Elles seraient difficiles à mettre en œuvre dans de petits ordinateurs. Les progrès dans le domaine des matériaux pourraient toutefois changer la donne dans un avenir proche, comme ce fut le cas pour les mémristors il y a quelques années seulement.

En 2010, notre équipe a montré que la méminformatique pouvait être plus performante en termes de rapidité que les ordinateurs actuels. Nous nous sommes intéressés au problème qui consiste à trouver un chemin pour sortir d'un labyrinthe. Les algorithmes de ce type sont depuis longtemps une façon de tester l'efficacité du matériel informatique. Les méthodes classiques de résolution des labyrinthes explorent le labyrinthe par de petites étapes consécutives. Par exemple, un des algorithmes les plus simples est le « suiveur de mur ». Il longe le mur du labyrinthe et se déplace, pas à pas, de l'entrée à la sortie. Cette approche est lente.

Trouver en un clin d'œil l'issue d'un labyrinthe

La méminformatique, comme nous l'avons montré dans des simulations, résoudra le problème du labyrinthe avec une extrême rapidité. Prenons l'exemple d'un réseau de mémristors, un sur chaque couloir du labyrinthe et tous dans un état de haute résistance. Si nous appliquons une simple impulsion de tension entre les points d'entrée et de sortie, le courant ne circulera que le long du chemin qui correspond à la solution et sera bloqué par les impasses des autres chemins. En circulant, le courant modifie les résistances des mémristors

BIBLIOGRAPHIE

F. L. Traversa *et al.*, **Dynamic computing random access memory**, *Nanotechnology*, vol. 25(28), 285201, 2014.

M. Di Ventra et Y. Pershin, **The parallel approach**, *Nature Physics*, vol. 9, pp. 200-202, 2013.

Y. Pershin et M. Di Ventra, **Solving mazes with memristors : a massively parallel approach**, *Phys. Rev. E*, vol. 84(4), 046703, 2011.

M. Di Ventra *et al.*, **Putting memory into circuit elements : memristors, memcapacitors, and meminductors**, *Proceedings of IEEE*, vol. 97(8), pp. 1371-1372, 2009.

correspondants. L'impulsion passée, la solution du labyrinthe sera stockée dans les mémristors dont l'état a changé, et seulement ceux-là. Nous avons calculé et stocké la solution d'un seul coup.

Tous les mémristors participent simultanément à la résolution du problème du labyrinthe ; on peut donc parler de calcul parallèle. Ce type de traitement est différent du calcul parallèle mis en œuvre dans les ordinateurs actuels. Dans une machine multiprocesseur typique, des processeurs calculent différentes parties d'un programme et communiquent ensuite pour déterminer la réponse finale. Cela fait gagner du temps, mais on en perd une part non négligeable pour transférer l'information entre les processeurs et leurs mémoires associées. Dans le système méminformatique, le calcul parallèle se fait au sein du même circuit.

La méminformatique présente de réels avantages lorsqu'elle est appliquée à un type de problèmes difficiles à résoudre numériquement : calculer les propriétés d'un ensemble important de nombres entiers. C'est le type de défi auquel est confronté un ordinateur quand il tente de déchiffrer des codes complexes.

Supposez par exemple que vous donnez à l'ordinateur 100 entiers positifs et négatifs et que vous lui demandez de trouver au moins un sous-ensemble dont la somme vaut zéro. L'ordinateur devra alors passer en revue tous les sous-ensembles possibles et additionner tous les nombres de chaque sous-ensemble. Il devra étudier une à une les combinaisons possibles en allant chercher à chaque fois les nombres en mémoire. Cela conduit à une augmentation exponentielle du temps de calcul. S'il faut une seconde pour étudier un ensemble de 10 entiers, il faudrait 10^{27} secondes pour 100 entiers : des millions de billions d'années.

Comme avec le problème du labyrinthe, un mémordinateur peut calculer tous les sous-ensembles et les sommes en transférant une seule fois tous les nombres dans le processeur capable de les mémoriser. Le gain de temps serait énorme.

Malgré ces avantages, et bien que les composants existent déjà en laboratoire, les puces de méminformatique ne sont pas encore disponibles dans le commerce. Pour le moment, les premières versions sont testées dans des laboratoires universitaires et par quelques industriels afin de déterminer si ces nouveaux dispositifs sont assez robustes et supportent un usage répété, pour remplacer, par exemple, les puces de mémoire actuelles constituées de transistors et de condensateurs classiques. Ces puces sont celles que vous trouvez dans les clefs USB et les disques SSD. Les tests prennent du temps, car les composants doivent tenir des années sans tomber en panne.

Nous pensons que certains mémordinateurs seront disponibles dans un avenir très proche. Par exemple, en 2013, avec Fabio Lorenzo Traversa et Fabrizio Bonani, de l'École polytechnique de Turin, en Italie, nous avons proposé un concept de mémoire nommé DCRAM *(Dynamic Computing Random Access Memory)*. L'objectif est de remplacer les mémoires DRAM, évoquées précédemment.

Plus petits, plus rapides et plus économes en électricité,

les mémordinateurs offrent des perspectives captivantes.

Dans une mémoire DRAM, chaque bit d'information constituant le programme est représenté par une charge stockée sur un unique condensateur. Par conséquent, il faut un grand nombre de condensateurs pour représenter un programme.

Mais si nous les remplaçons par des mémcapacités, toutes les opérations logiques que requiert le programme peuvent être effectuées *in situ*, ce qui nécessite finalement un nombre plus petit de mémcapacités que de condensateurs dans cette zone de mémoire. En effet, en changeant la tension appliquée à une mémcapacité, on peut lui faire changer d'opération logique. Traiter des instructions telles que « faire *x* ET *y* », « faire *x* OU *y* » et « SINON faire *z* » s'effectuerait au moyen de deux mémcapacités, plutôt qu'avec un grand nombre de condensateurs classiques fixes. Nous n'aurions pas besoin de modifier l'architecture physique pour effectuer différentes fonctions. On parle dans ce cas de polymorphisme : un élément a la possibilité d'effectuer différentes opérations selon le type de signal d'entrée. Notre cerveau est doté de cette faculté, mais pas nos ordinateurs actuels, parce que les circuits de leurs processeurs sont fixes.

Un autre avantage des mémordinateurs est qu'il est possible de les fabriquer dans les usines existantes, car ils ne représentent pas un saut technologique important. Le frein viendrait plutôt du besoin de concevoir de nouveaux programmes pour contrôler ces nouvelles machines. Ils devront être développés, testés et optimisés avant de pouvoir profiter pleinement des capacités de cette future génération d'ordinateurs.

Une piste à moyen terme serait d'imaginer des formes hybrides de machines et de trouver le meilleur moyen d'intégrer ces nouveaux mémcomposants à nos ordinateurs actuels. Cela pourrait être une bonne idée de conserver les processeurs actuels pour effectuer des tâches simples (comme écrire un texte) tout en utilisant des éléments de méminformatique dans la même machine pour des opérations plus complexes.

Il est tentant d'imaginer jusqu'où cette nouvelle technologie pourrait nous emmener. Une fois la technologie éprouvée, les utilisateurs pourraient être dotés d'un petit dispositif, qui tiendrait peut-être dans le creux de la main, chargé de s'attaquer aux problèmes très complexes faisant intervenir, par exemple, la reconnaissance de motifs ou la modélisation du climat à des échelles très fines. Des tâches qu'il pourrait traiter en une ou deux étapes de calcul, pour un coût et une consommation énergétique très faibles.

Ne seriez-vous pas prêts à faire la queue pour en avoir un ? ■

© Pour la Science - n° 452 - Juin 2015