Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 128 (2002)
Heft: 18: Au-dessus des voies

Artikel: Sur le BioWall, l'embryonique se décline de façon ludique
Autor: Stauffer, André / Mange, Daniel / Tempesti, Gianluca
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80307

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

André Stauffer, Daniel Mange, Gianluca Tempesti, Christof Teuscher

Sur le **BioWall**, l'embryonique se décline de façon ludique

INFORMATIQUE

L'un comporte soixante mille milliards de cellules, l'autre trois mille; l'un existe depuis quelque cent mille ans, l'autre fêtera bientôt ses six mois. Le premier, soit l'être humain, se définit par une complexité dépassant nos possibilités de représentation et il n'a, à ce jour, généré que de faibles copies du lui-même. Le second a pour nom BioWall, il a été inauguré à Ste Croix au mois de février dernier, et il réunit pour la première fois certaines caractéristiques fondamentales du vivant: la capacité de se développer, d'évoluer et d'apprendre. Il s'agit d'une création appartenant à un nouveau type de produits artificiels destinés à reproduire le vivant et classifiés sous l'appellation d'ingénierie bio-inspirée. Parmi les principaux éléments à la base de cette discipline, on trouve les réseaux neuronaux artificiels - copie grossière du fonctionnement du cerveau et du système nerveux -, les algorithmes génétiques - qui s'inspirent du mécanisme de sélection naturelle pour résoudre des problèmes d'optimisation complexe[1] - et l'embryonique[2] - soit la conception de circuits électroniques reposant sur l'imitation des mécanismes biologiques d'êtres multicellulaires. Quelques aspects de cette recherche, généralement poursuivie dans le secret des laboratoires, s'affichent désormais sur un mur «vivant», le BioWall. Les hasards d'une rencontre avec Mme Jacqueline Reuge, à Sainte-Croix, ont permis de construire un modèle géant de cellules humaines aux fins de stimuler la curiosité des enfants et du public et de les faire entrer dans un univers inaccessible en temps normal. Ces nouvelles compétences introduites par l'embryonique visent, non pas à rendre la machine plus «intelligente» - au sens cognitif du terme - mais plutôt interactive (capable de dialoguer, de montrer des réactions, d'apprendre), ce qui aujourd'hui passionne davantage les chercheurs.

Dans chacune de nos soixante mille milliards de cellules, le génome, une bande de deux milliards de caractères, est décodé pour construire l'organisme et y produire les protéines nécessaires à sa survie. Les processus en jeu sont discrets et ils sont contenus dans l'ADN, séquence organisée à partir des quatre bases: adénine, cytosine, guanine et thymine. Ce fonctionnement discret, que l'on retrouve dans les processus informatiques, est à la base des systèmes matériels bio-inspirés, à la conception desquels le Laboratoire de systèmes logiques de l'EPFL travaille depuis plusieurs années. A travers

1

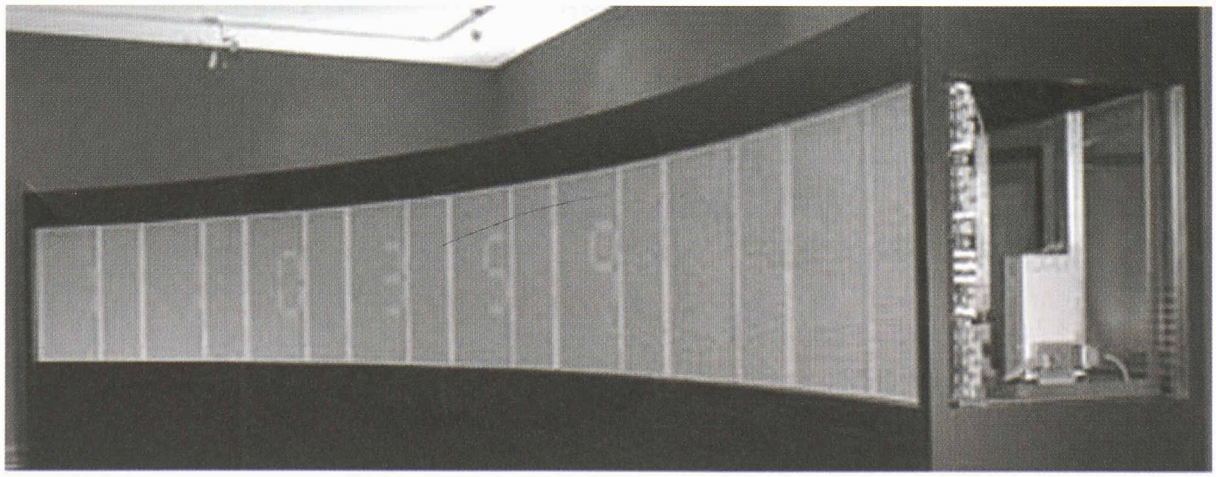


Fig. 1 : Vue frontale du Biowall

Fig. 2 : a) Représentation schématique d'une unité du Biowall; b) Vue partielle des circuits FPGA Xilinx

le projet Embryonique [9][3] [10], ce dernier vise plus spécifiquement à conférer au matériel informatique certaines propriétés des organismes biologiques multicellulaires, telles la croissance et la tolérance aux pannes.

Dans le but de familiariser le grand public à ces recherches, un dispositif de démonstration géant a été conçu pour être exposé. Le BioWall (fig. 1) est l'exemple macroscopique d'un tel système informatique. Le béotien peut visualiser les principes cellulaires mentionnés plus haut, en interagissant directement avec le tissu informatique de quelques mètres de long (5,3m x 0,6 m x 0,5 m = 3,68m^3). Le BioWall constitue également un outil de recherche précieux, dans la mesure où sa faculté de re-programmation et sa structure cellulaire s'adaptent parfaitement à l'implémentation de toutes sortes de systèmes bio-inspirés. Pour illustrer ces capacités, plusieurs applications y ont été installées et testées matériellement.

Le BioWall, une machine embryonique

La structure des machines embryoniques [9] [10] est hiérarchique. L'élément de base en est la cellule (petit processeur), elle-même constituée de plusieurs molécules (éléments logiques programmables) en réseau. Un organisme (système spécialisé) résulte de l'utilisation en parallèle de plusieurs cellules. Ainsi, le BioWall correspond à un tissu bidimensionnel composé d'unités (représentant chacune une molécule), où chaque unité (fig. 2a) est constituée d'un élément d'entrée (une membrane tactile), d'un élément de sortie (une matrice de 8 x 8 = 64 diodes électroluminescentes bicolores) et d'un élément de calcul programmable (un circuit FPGA *Xilinx Spartan* XCS10XL [21]). Le BioWall renferme 3200 unités, disposées en 20 rangées.

Ce tissu représente une puissance de calcul considérable (3200 circuits FPGA, dont la figure 2b montre quelques exemplaires), couplée à une interface d'entrée/sortie (les membranes et les matrices de diodes) qui assure une interaction tactile et visuelle à grande échelle. Les avantages de cette solution sont évidents: tout d'abord, la taille de l'affichage permet une interaction immédiate avec des applications qui se limitent normalement à des simulations logicielles sur l'écran d'un ordinateur; ensuite, la puissance de calcul et la faculté de re-programmation inhérentes aux circuits FPGA permettent le prototypage de toutes sortes de systèmes bio-inspirés.

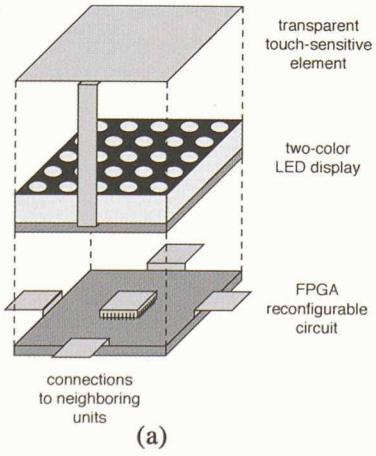
Pour le moment, chacun des circuits FPGA *Xilinx* du BioWall ne peut être programmé qu'avec la même configuration, ce qui réduit la fonctionnalité des unités aux dix mille portes logiques équivalentes du circuit FPGA. En outre, les délais considérables engendrés par la propagation de signaux globaux sur des distances de plusieurs mètres limitent la fréquence du signal d'horloge à quelques MHz (une fréquence qui demeure plus qu'adéquate, si l'on tient compte du parallélisme massif de la machine, et qui reste considérablement plus élevée que le rythme des interactions humaines dans la plupart des applications).

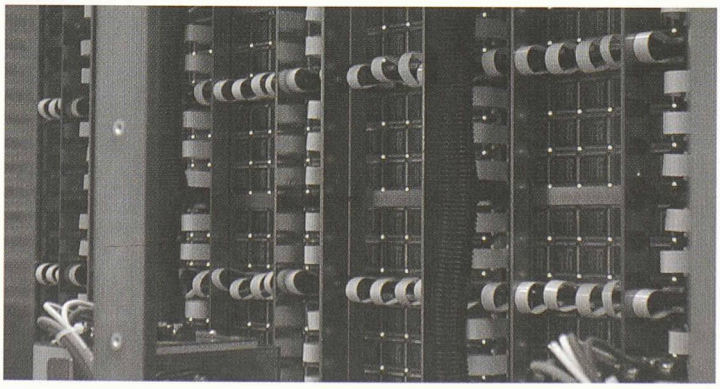
Outre les possibilités d'entrée/sortie des membranes et des diodes mentionnées précédemment, un ensemble de modules placés à la périphérie de la machine permettent d'interfacer le tissu avec des circuits logiques standard, soit via le PC ou directement avec des circuits conçus par l'utilisateur (les modules n'autorisent évidemment l'accès qu'à la périphérie du réseau mais, si cela s'avère nécessaire, les circuits

[1] Voir références bibiographiques 10 et 15 sur les algorithmes génétiques

[2] «La BIOWATCH : copier le vivant pour en acquérir la robustesse», Daniel Mange, *IAS* N°9, 16 avril 1997, p. 146-149

[3] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibiographie en fin d'article.



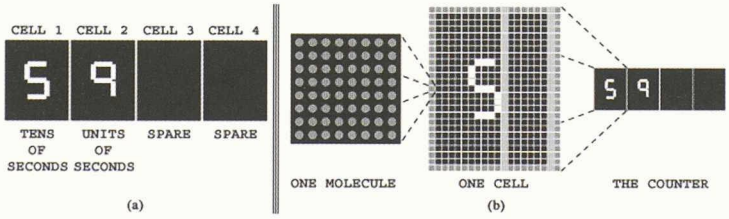


2

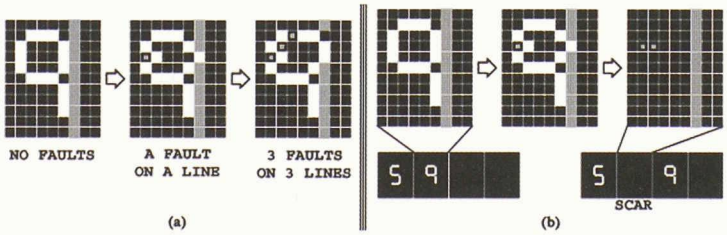
FPGA peuvent être programmés de façon à assurer la propagation interne des signaux).

Les outils logiciels développés pour le BioWall sont rudimentaires, mais complets. Une simple interface sur le PC permet à l'utilisateur de définir un ensemble de fichiers destinés à la configuration du tissu. Actuellement, il y a quatre types de fichiers (d'autres pouvant être ajoutés): le fichier de configuration pour les circuits FPGA *Xilinx* et des fichiers présentant trois formats différents pour envoyer des données définies par l'utilisateur sur les bornes d'entrée disposées à la périphérie du tissu (pour initialiser l'état d'un automate cellulaire, par exemple). Les valeurs prises par les bornes de sortie à la périphérie du tissu peuvent être lues par le PC qui les stocke sur disque ou les utilise directement.

3



4



La BioWatch

Le BioWall synthétise en lui toutes les propriétés d'une machine embryonique: la capacité de croissance générée par auto-réplication et réparation, celle d'évoluer et d'apprendre. Son noyau est constitué par la BioWatch, organisme dont la fonction, fort simple, se résume à compter les heures, les minutes et les secondes.

Le principe organisationnel

La nouveauté réside dans l'approche: la BioWatch ne se comporte pas comme une simple montre, mais comme un être multicellulaire qui, au départ, va se construire, puis se réparer si nécessaire. Les capacités d'auto-réparation des machines embryoniques sont basées sur le principe général d'organisation des êtres vivants: la différentiation cellulaire [16]. Tout organisme est un assemblage de cellules contenant, chacune, une copie complète du programme génétique, le génome. Cette architecture confère une très grande robustesse à l'ensemble, puisque chaque cellule en possède le plan complet et peut donc remplacer n'importe quelle autre cellule défaillante. Toutefois, comme pour tous les organismes artificiels ou naturels, la mort d'un nombre excessif de cellules n'autorise plus la réparation et entraîne la mort de l'organisme. A la différence du vivant, l'environnement contrôlé dans lequel opèrent les machines leur permet, en cas de mort de l'organisme, d'effectuer une réinitialisation complète du système, effaçant ainsi toutes les fautes injectées pour engendrer une nouvelle machine en parfait état de marche.

Le fonctionnement

Transformé en montre vivante, le BioWall égrène les secondes de 00 à 59 (fig. 3). De gauche à droite, l'affichage montre les dizaines de secondes (de 0 à 5), les unités de secondes (de 0 à 9) et une zone de réserve, qui reste inactive pendant le fonctionnement normal. On dira que le compteur est divisé en quatre cellules: deux cellules actives (indiquant respectivement les dizaines et les unités) et deux cellules de réserve. Chaque cellule est une mosaïque de 20 x 25 = 500 molécules (fig. 3b), qui inclut deux colonnes de réparation (2 x 25 = 50 molécules).

Le visiteur est maître de la vie de chaque molécule: il peut introduire une irrégularité dans n'importe laquelle par une simple pression du doigt sur la membrane de l'unité correspondante. Inclus dans la couche moléculaire, le dispositif de détection de faute décèle alors l'erreur et active le mécanisme d'auto-réparation moléculaire. La molécule sacrifiée est instantanément remplacée par sa voisine immédiate, à sa droite et ainsi de suite jusqu'à la plus proche colonne de réparation (fig. 4a). Ce mécanisme d'auto-réparation implique qu'on ne peut supprimer qu'une seule molécule par ligne, entre deux colonnes de réparation. Si cette contrainte est respectée, la cellule survit, au prix d'une déformation du chiffre affiché.

Si la règle précédente est transgressée, plusieurs fautes étant insérées à la cellule sur la même ligne entre deux colonnes de réparation, l'auto-réparation moléculaire n'est plus possible et la cellule meurt. Cette mort n'entraîne toutefois pas celle de l'organisme, la cellule éliminée étant instantanément remplacée par une autre, en réserve, située immédiatement à sa droite (fig. 4b). La cellule morte est

Fig. 3 : a) L'organisme Counter; b) Implémentation BioWall de la hiérarchie embryonique

Fig. 4 : a) Autoréparation moléculaire; b) Autoréparation cellulaire (cicatrisation)

Fig. 5 : Implémentation BioWall de la BioWatch complète

Fig. 6 : Le Jeu de la Vie: à partir de règles simples, des comportements globaux complexes apparaissent, ici le dragon.

éteinte et devient cicatrice. Il convient de noter qu'au cours de ce processus d'auto-réparation cellulaire, le comptage du temps se poursuit imperturbablement: le tissu mémorise le temps écoulé et le sauve. De plus, nous implémentons actuellement un mécanisme de résurrection moléculaire: lorsqu'un nombre critique de fautes est atteint (en pressant la membrane des molécules fautives), la cellule morte se réactive et recommence le comptage tout en assurant le sauvetage du temps écoulé (fig. 5).

Les moyens

Comment cela est-il construit ? Le support est un élément fini de silicium à deux dimensions, divisées en lignes et en colonnes, dont l'intersection définit une cellule. Toutes les cellules présentent une structure matérielle identique, seul leur état diffère (valeur de leurs mémoires), et le développement de l'organisme artificiel multicellulaire se fait à partir d'une seule cellule, la cellule mère. Mais, tout en détenant l'information complète de la cellule mère, chaque cellule va remplir une fonction unique. Ces principes d'organisation sont suffisants pour que le système soit capable de croissance, de réplication et d'auto-réparation. La BioWatch le prouve en réparant seule, grâce à des cellules de réserve, des informations qu'un doigt malicieux aurait effacées.

Les applications

Une plate-forme dotée de telles capacités a de nombreuses applications. Elle constitue notamment une base idéale pour le prototypage de toutes sortes de systèmes cellulaires à deux dimensions, c'est-à-dire de systèmes composés d'un réseau de petits éléments interconnectés localement. Les automates cellulaires, par exemple, forment ainsi un environnement très courant dans le domaine de la recherche bio-inspirée [3]; on peut citer le Jeu de la Vie (fig. 6) de John Conway [2], les boucles autoréplicatives développées initialement par Chris Langton et le constructeur universel de von Neumann [20].

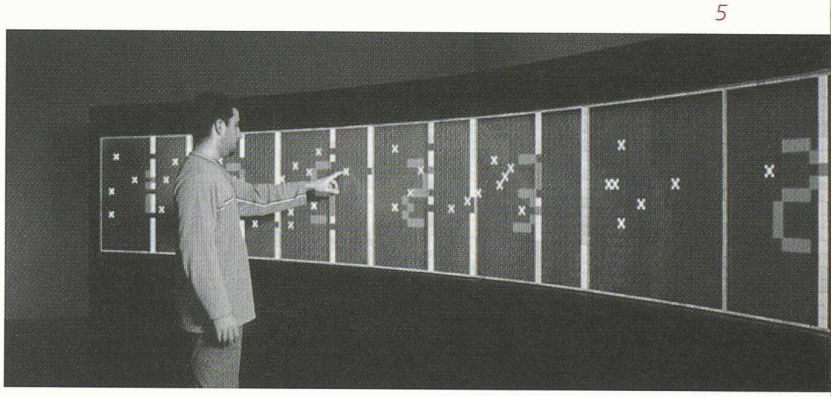
Réseau neuromimétique

D'autres exemples d'implantation de systèmes bio-inspirés méritent également d'être mentionnés, comme le type particulier de réseaux neuromimétiques artificiels développés par Alan Turing [19] (voir encadré) et la réalisation bidimensionnelle de Firefly [13], une machine conçue et construite pour démontrer la faisabilité d'une évolution matérielle en ligne.

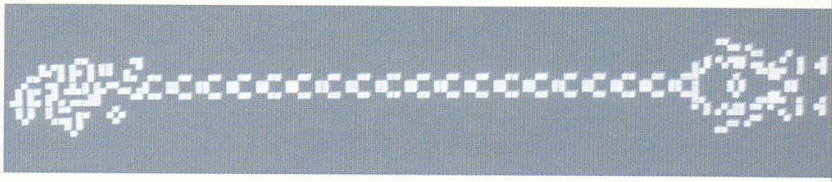
Principe

En 1948, Alan Turing rédigea un rapport peu connu intitulé «Intelligent Machinery» [18] [19], qui renferme une investigation fascinante des modèles connexionistes que l'on appellerait aujourd'hui réseaux neuromimétiques. En décrivant des réseaux de neurones aléatoirement interconnectés, Turing a ainsi écrit l'un des premiers manifestes dans le domaine de l'intelligence artificielle (bien qu'il n'utilisât pas ce terme). Turing qualifiait ses réseaux de machines désorganisées et il en proposait essentiellement trois sortes: les machines désorganisées de type A, de type B et de type P. Les machines de type A et de type B sont des réseaux booléens

5



6

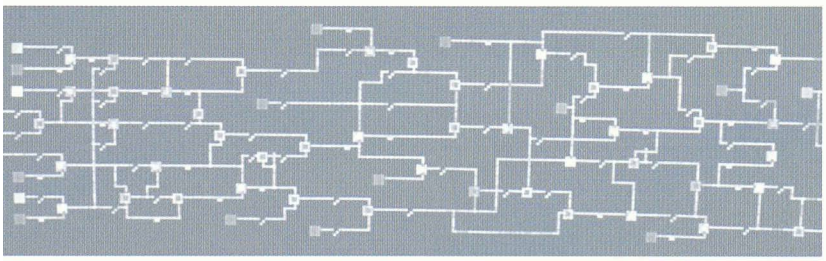


résultant de l'interconnexion aléatoire de portes NAND (les neurones) avec chacune deux entrées (les synapses) provenant des autres neurones, ces derniers étant synchronisés par un signal d'horloge global. A la différence des réseaux de type A, ceux de type B disposent de connexions modifiables (de simples interrupteurs), qui permettent à un agent extérieur d'organiser ces machines (par fermeture ou ouverture de connexions) pour effectuer le travail requis, ces interventions revenant à renforcer les liaisons utiles et à couper celles qui ne le sont pas. La motivation profonde étant toujours de concevoir des machines capables d'apprendre, l'idée d'organiser initialement un réseau aléatoire de neurones et de connexions constitue sans aucun doute la contribution essentielle du papier de Turing. Le premier, il a rêvé de construire un cerveau artificiel à partir d'éléments simples reliés entre eux par un large réseau aléatoire de connexions, et il a eu recours à une forme de recherche génétique pour ordonnancer ces machines non-organisées.

Fonctionnement

Le réseau neuromimétique de Turing a été implémenté dans le tissu reconfigurable du BioWall. Chacune des 3200 unités de la machine peut être configurée interactivement en choisissant l'une des cinq fonctions suivantes: cellule vide, neurone, connexion, synapse ou cellule d'entrée. La figure 7 montre une configuration possible. L'utilisateur (le superviseur externe) est invité à découvrir et à modifier le comportement de la machine désorganisée de type B en ouvrant ou fermant les synapses (en organisant la machine) et en faisant varier les entrées du réseau. Toutes les modifications résultent d'une simple pression sur les membranes tactiles correspondantes. Outre qu'elle constitue une réalisation du réseau neuromimétique de Turing dans du matériel reconfigurable (la première, à notre connaissance), cette application concrétise également la fusion des axes d'évolution par algorithmes génétiques et de développement par apprentissage (ontogénétique et épigénétique) dans un seul et même tissu artificiel.

7



Firefly 2D

Le processus d'évolution est mis en évidence dans le système Firefly.

Principe

En 1997, le Laboratoire de systèmes logiques avait réalisé un système matériel évolutif de programmation cellulaire, Firefly [13], dans lequel les cellules d'un automate évoluent en parallèle pour résoudre un problème spécifique. Le problème, étudié et résolu avec succès, était celui de la synchronisation d'un automate cellulaire unidimensionnel: à partir d'une configuration initiale quelconque de 0 et de 1, l'automate non-uniforme doit atteindre, en *M* pas de temps, une configuration finale dans laquelle l'ensemble de ses cellules oscillent de manière synchrone en présentant toutes simultanément des 0 et des 1 à chaque pas de temps. La nouveauté introduite par la matérialisation de Firefly consiste à opérer sans se référer à un dispositif externe (tel qu'un ordinateur réalisant les opérations génétiques). Le système implémente par conséquent une évolution autonome en ligne.

Fonctionnement

Alors que la machine Firefly originale résolvait le problème de la synchronisation d'un automate cellulaire unidimensionnel, l'implémentation réalisée dans les 3200 circuits FPGA du BioWall apporte une solution à ce problème dans le cas d'un automate bidimensionnel (fig. 8). Les bases théoriques de l'extension d'une à deux dimensions du problème de la synchronisation sont présentées dans [13].

L'implémentation bidimensionnelle BioWall matérialise un automate cellulaire non-uniforme à deux états et cinq voisins, dans lequel chaque cellule (chaque circuit FPGA du BioWall) admet une table de règles différente. Dans la cellule, cette table est encodée sous forme d'une chaîne de bits, appelée génome, dont la longueur s'élève à $2^5 = 32$ bits. Au lieu de faire appel à une population d'automates cellulaires évolutifs, notre algorithme opère l'évolution d'un seul automate cellulaire non-uniforme de la taille du BioWall dans son entier (une cellule de l'automate par unité du BioWall, soit 3200 cellules), dont les tables de règles sont initialisées aléatoirement. De nouvelles configurations initiales sont générées aléatoirement par la suite et utilisées chacune par l'automate cellulaire pendant *M* pas de temps. Le fitness accumulé de chaque cellule résulte de la sommation des fitness individuels obtenus au cours de *C* configurations successives. A partir de chacune de ces configurations initiales, le fitness individuel de la cellule vaut 1 lorsque la séquence d'états 0-1-0-1 est obtenue lors des pas de temps *M*+1 à *M*+4, et 0 dans le cas contraire. Les tables de règles sont modifiées toutes les *C* configurations par crossover et par mutation sur la base des fitness accumulés. Ce processus d'évolution est réalisé de manière locale, car les opérations génétiques d'une cellule n'impliquent que la cellule elle-même et ses quatre voisins cardinaux.

8

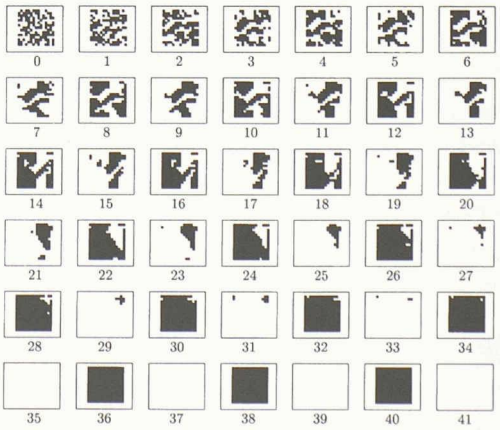


Fig. 7 : Implémentation BioWall du réseau neuromimétique de Turing (type B)

Fig. 8 : Problème de la synchronisation 2D : automate cellulaire co-évolué non-uniforme à deux états et cinq voisins. Dès le 35e pas, l'ensemble des cellules oscillent, présentant toutes des 0 puis des 1.

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

Contrairement aux algorithmes génétiques standard, dans lesquels une population de solutions au problème évolue de manière globale par croisement et sélection, notre approche repose sur un réseau de tables de règles qui co-évoluent de manière locale. Les cellules de l'automate réalisent ainsi des calculs dans lesquels n'interviennent que les états de leurs voisins les plus proches. Il en va de même pour le processus d'évolution, car tant la détermination des fitness que les opérations génétiques s'effectuent localement.

L'implémentation, dans le BioWall, de l'approche de type programmation cellulaire précédemment décrite, nous prouve qu'il est possible d'amener un automate cellulaire non-uniforme de rayon 1 à résoudre le problème de la synchronisation. Après avoir déterminé un ensemble de tables de règles satisfaisant le problème, la modification de l'état de chaque cellule de l'automate résulte d'une simple pression sur la membrane tactile correspondante. L'utilisateur peut alors observer comment la machine réalise la synchronisation de ses 3200 cellules.

Envol vers de nouveaux systèmes bio-inspirés

Les applications présentées ne constituent qu'un petit exemple des capacités du BioWall, capacités que nous continuons de découvrir. Sa structure cellulaire fait de cette machine une plate-forme idéale pour le prototypage de systèmes bio-inspirés. Ceux-ci exploitent en effet souvent une telle structure, que l'on retrouve communément à tous les niveaux dans la nature. La taille du BioWall impose cependant un certain nombre de limitations (fréquence d'horloge, par exemple), mais sa faculté de re-programmation lui confère une remarquable souplesse d'emploi. Les interactions visuelles et tactiles du système constituent des supports incomparables pour la dissémination des idées et la vérification matérielle de concepts souvent réduits aux simulations logicielles.

Parmi les autres applications bio-inspirées que nous avons implémentées ou que nous projetons d'implémenter, nous citerons, par exemple, les L-systèmes [8], les fourmis, les environnements proie-prédateur, d'autres espèces d'automates cellulaires et des réseaux neuromimétiques plus conventionnels. Une application (ou plus précisément un groupe d'applications) mérite cependant une mention spéciale.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'inspiration biologique pour la conception de machines informatiques découle essentiellement de trois modèles biologiques [15]: celui du développement des espèces au cours de l'évolution (phylogenèse), celui du développement individuel dirigé par le code génétique (ontogenèse) et celui de l'apprentissage

La Suisse et l'aventure informatique

Si la Suisse n'a pas encore réussi à exploiter ses idées novatrices en matière d'ordinateurs et à se frayer le chemin de la production de masse, elle a cependant posé des jalons importants dans le développement de ces machines. En 1976, le professeur Niklaus Wirth de l'EPFZ, de retour de Palo Alto en Californie, ramenait dans ses bagages une souris d'ordinateur et le projet d'une station de travail correspondant au multimedia de l'époque: un écran graphique à haute résolution, une ébauche de système *Windows* et l'utilisation de la souris comme interface en étaient les points forts. Commercialisé en 1982 par la compagnie *DISER* (Data-Image-Sound-Processor and Emitter-Receiver system), le *Lilith* fut vendu à 120 exemplaires, puis rapidement détrôné par de nouvelles générations de microprocesseurs. Il n'en reste pas moins que Niklaus Wirth a développé plusieurs langages de programmation géniaux reposant sur des concepts mathématiques clairs et structurés: Pascal, Modula et Oberon. Dès 1974, soit avant la naissance du premier produit d'*Apple*, le professeur Jean-Daniel Nicoud de l'EPFL a tenté l'expérience du *Smaky*, le «Mac Intosh Suisse», après avoir développé les premières souris «made in Switzerland» pour son collègue zurichois. Raccourci de «Smart Keyboards», le nom de cet ordinateur ne laisse que peu transparaître l'originalité d'une machine aux caractéristiques techniques enthousiasmantes, conçue comme un objet ludique et d'utilisation facile destiné aux écoliers. Elle a été produite par la société suisse *Epsitec* jusqu'en 1997. De ces années d'aventures et d'émulation autour du laboratoire de microinformatique, il reste la souris, industrialisée par Daniel Borel, et l'entreprise *Logitec* qui a pris le leadership de la production de masse dans les produits spécialisés à l'interface homme-machine. La dernière tentative en date remonte au 23 août 2000, jour où l'EPFL a inauguré le *SWISS-T1*, une machine massivement parallèle qui déploie une puissance de 70 gigaflops. Cet ordinateur, développé conjointement par Ralf Gruber de l'EPFL, concepteur de ce super-ordinateur, la start-up *SCS* lancée par le professeur Anton Gunzinger de l'EPFZ et le centre de calcul scientifique de Manno, détrône désormais les *Cray*. La collaboration avec *Compaq* a permis de recourir à des unités standard de calcul, les serveurs *alpha* alors que le système de communication entre serveurs était proposé par *SCS* à Zurich. L'EPFL, riche de ses nombreux utilisateurs de simulation numérique (nouveaux matériaux, mécanique des fluides, physique des plasmas, fusion thermonucléaire, biotechnologie) a donc adapté ses algorithmes à la nouvelle machine, renforçant ainsi ce savoir-faire suisse en matière de calcul scientifique. Les chercheurs espèrent que les crédits seront alloués pour poursuivre l'aventure des *SWISS-Tx*.

Pour les nostalgiques de cette informatique si vite obsolète, le musée Bolo[1] dont la vitrine se trouve à l'EPFL, expose près de trois cents machines différentes: *Atari 400*, précurseur des play stations, *Lisa 2* de *Apple*, premier micro doté d'une véritable interface graphique, *Smaky*, etc.

[1] <www.bolo.ch>

(épigenèse). Ces trois modèles partagent une base commune: une description unidimensionnelle de l'organisme, le génome. Alors que ces trois modèles ont tous déjà servi séparément comme source d'inspiration pour le développement de machines informatiques, leur fusion au sein d'un même système demeure un réel défi et repose sur le modèle global POE (phylogenèse, ontogenèse, épigenèse).

Depuis septembre 2001, en collaboration avec l'Université de York (Angleterre), l'Université polytechnique de Catalogne (Espagne), l'Université de Glasgow (Ecosse) et l'Université de Lausanne (Suisse), notre laboratoire poursuit un projet de recherche dans le cadre du programme *Information Society Technologies* (IST) de la communauté européenne. D'une durée de trois ans, ce projet vise au développement d'un substrat informatique optimisé pour l'implémentation de systèmes numériques inspirés par les trois modèles biologiques précités.

Le tissu «POEtique» sera une surface cellulaire composée d'un nombre variable d'éléments. Chacune de ses cellules sera capable de communiquer avec l'environnement (à l'aide de senseurs et d'actuateurs) et avec les cellules voisines (par des canaux bidirectionnels) pour exécuter une fonction spécifique. Toutes les cellules du tissu présenteront une structure de base identique, mais pourront acquérir des capacités diverses, au même titre que les cellules totipotentes ou cellules souches dans les organismes vivants [11]. La flexibilité résultera d'une organisation à trois couches: la couche génotype, la couche configuration et la couche phénotype. La couche génotype de chaque cellule contiendra la description complète de l'organisme sous forme d'un génome numérique. La couche configuration déduira du génome une chaîne de configuration destinée à la commande de l'unité de traitement de la couche phénotype. Le tissu sera ainsi organisé sous forme d'une structure informatique multicellulaire massivement parallèle. Dans cette structure, des groupes de cellules pourront collaborer pour réaliser une tâche donnée et créeront de la sorte des sous-structures semblables aux organes dans les organismes vivants.

Bien que le projet «POEtique» manifeste en fin de compte des capacités supérieures à celles du BioWall, il sera nécessaire, au cours des étapes initiales du projet, de pouvoir prototyper rapidement des tissus pour non seulement analyser

Alan Turing le précurseur

A l'EPFL, la journée du 29 juin était consacrée à un pionnier de l'informatique, à l'occasion du 90e anniversaire de sa naissance: Alan Turing.

Né le 23 juin 1912 près de Londres, il a introduit un concept de grande importance: l'idée de la machine à calculer universelle, et démontré que, si un problème est calculable, alors il existe une machine pour le résoudre. Cette machine théorique est composée d'une mémoire qui stocke les algorithmes et les données et d'une tête de lecture-écriture qui parcourt la mémoire. Chaque instruction de base est simple, mais de l'association d'un grand nombre d'entre elles naît la complexité. La machine Turing est à la base des théories numériques modernes. Elle a l'avantage d'une approche universelle, rattachée au fonctionnement de l'esprit, et non pas liée à la recherche d'une solution à un problème particulier: à partir d'une méthode définie, un problème peut en effet être traduit sous une forme (algorithme) se prêtant au traitement mécanique. En fait, le calculateur imaginé en 1936 par Turing correspond au programme informatique et à la mise en œuvre des tâches mécaniques déterminées par celui-ci, qui est aujourd'hui exécutée par l'ordinateur. Mais, ce n'est que neuf ans plus tard, que la technologie électronique permettra de tester les idées de son inventeur.

Muni de son concept de machine universelle, convaincu du potentiel offert par l'électronique émergente, et conscient de l'inefficacité d'exécution des machines (hardware), Alan Turing se remet à ses recherches après la Seconde Guerre mondiale - durant laquelle il s'est employé à décrypter les messages allemands codés au moyen de la machine Enigma - et conçoit l'Automatic Computing Machine. Il met au point un langage, l'«Abbreviated Code Instructions», précurseur du langage de programmation puis, ne voyant pas venir la réalisation de ses projets en partie freinés par l'entreprise concurrente de Von Neumann, il se lance dans l'étude de la neurologie et de la physiologie à partir de laquelle il esquisse les bases de l'intelligence artificielle. Il postule, en 1947, qu'un système mécanique suffisamment complexe peut exhiber des capacités d'apprentissage. Longtemps méconnu, il est désormais reconnu comme le père de l'intelligence artificielle, même si la machine intelligente qu'il préconisait n'a pas encore vu le jour.

leurs qualités et leurs défauts mais également leur faisabilité matérielle (une considération souvent ignorée par les simulations logicielles). La versatilité du BioWall en fera par conséquent un outil indispensable pour le succès du projet «POEtique».

Le BioWall a attiré 10 000 visiteurs durant les huit mois de son exposition à la Villa Reuge [23]. Suite à la fermeture de ce musée, sa prochaine destination est encore inconnue. Grâce au soutien généreux de Mme Reuge, nous avons cependant conservé une version réduite de la machine (2000 unités) comme outil de recherche dans notre laboratoire [22]. Nous sommes ainsi en mesure de développer de nouvelles applications tout en améliorant les caractéristiques du tissu. Les modifications envisagées incluent le perfectionnement de l'interface d'entrée/sortie et la possibilité de configurer chacun des circuits FPGA indépendamment des autres, de façon à accroître encore la versatilité du tissu.

André Stauffer, Daniel Mange,
Gianluca Tempesti, Christof Teuscher
Laboratoire de systèmes logiques, I&C-EPFL
CH - 1015 Lausanne

Remerciements
Nous remercions la rédaction du *Flash informatique* de l'EPFL qui nous a permis d'utiliser le texte - qui a inspiré le nôtre - ainsi que les illustrations publiées dans son numéro 4 du 30 avril 2002.

Le BioWall s'expatrie

Du 18 septembre au 20 octobre 2002, un prototype du BioWall sera exposé à Paris dans le cadre du festival international «@rt Outsiders 2002» organisé par la Maison européenne de la photographie.

La troisième édition de cette manifestation a en effet pour thème la vie artificielle et les lecteurs intéressés sont invités à consulter Internet pour les renseignements et détails complémentaires <http://www.art-outsiders.com>.

Références

[1] J.-L. Beuchat, J.-O. Haenni: «On Neumann's 29-State Cellular Automaton: A Hardware Implementation», *IEEE Trans. on Education*, Vol. 43, n° 3, pp. 300-308, August 2000
[2] E.R. Berlekamp, J.H. Conway, R.K. Guy. Winning: «Ways for your Mathematical Plays», Vol.2: Games in Particular. London, 1985, Academic Press
[3] A. Burks (ed.): «Essays on Cellular Automata», Urbana IL, 1970, University of Illinois Press
[4] K.E. Drexler: «Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation», New York, 1992, John Wiley
[5] R.A. Freitas and W.P. Gilbreath (eds.): «Advanced automation for space missions: Proceedings of the 1980 NASA/ASEE summer study. NASA, Scientific and Technical Information Branch (available from U.S.G.P.O., Publication 2255)», Washington D.C., 1980.
[6] J.E. Hopcroft, J.D. Ullman: «Introduction to Automata Theory Languages and Computation», Redwood City, CA, 1979, Addison-Wesley
[7] C. Langton: «Self-reproduction in cellular automata», *Physica D*, 10:135-144, 1984
[8] A. Lindenmayer: «Mathematical models for cellular interaction in development, parts I and II», *Journal of Theoretical Biology*, 18:280-315, 1968
[9] D. Mange, M. Sipper, A. Stauffer, G. Tempesti: «Towards Robust Integrated Circuits: The Embryonics Approach», *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, n°. 4, pp. 516-541, April 2000
[10] D. Mange and M. Tomassini (eds.): «Bio-Inspired Computing Machines», Lausanne, Switzerland, 1998, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
[11] H. Pearson: «The Regeneration Gap», *Nature*, vol. 414, 22, p. 388-390, November 2001
[12] J.A. Reggia, S.L. Armentrout, H.-H. Chou, and Y. Peng: «Simple systems that exhibit self-directed replication», *Science*, 259:1282-1287, February 1993
[13] M. Sipper: «The Evolution of Cellular Automata: The Cellular Programming Approach», Berlin, 1997, Springer-Verlag
[14] M. Sipper: «Fifty years of research on self-replication: An overview», *Artificial Life*, 4:237-257, 1998
[15] M. Sipper, E. Sanchez, D. Mange, M. Tomassini, A. Pérez-Uribe, and A. Stauffer: «A phylogenetic, ontogenetic, and epigenetic view of bio-inspired hardware systems», *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, n°. 1, pp. 83-97, April 1997
[16] A. Stauffer, D. Mange, G. Tempesti, and C. Teuscher: «BioWatch: A giant electronic bio-inspired watch», *in* D. Keymeulen, A. Stoica, J. Lohn and R.S. Zebulum (eds.), *Proceedings of the Third NASA/DOD Workshop on Evolvable Hardware (EH-2001)*, pp.185-192, Pasadena CA, 2001, IEEE Computer Society
[17] A. Stauffer and M. Sipper: «Externally controllable and destructible self-replicating loops», *in* J. Kelemen and P. Sosik (eds.): «Advances in Artificial Life: Proceedings of the 6th European Conference on Artificial Life (ECAL 2001)», *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2159:282-291, Heidelberg, 2001, Springer-Verlag
[18] C. Teuscher, «Turing's Connectionism. An Investigation of Neural Network Architectures», London, 2001, Springer-Verlag
[19] A.M. Turing: «Intelligent Machinery», *in* B. Meltzer and D. Michie (eds.), *Machine Intelligence*, volume 5, pages 3-23, Edinburgh, 1969, Edinburgh University Press
[20] J. von Neumann: «The Theory of Self-Reproducing Automata», A.W. Burks (ed.), Urbana, IL, 1966, University of Illinois Press
[21] Xilinx Corp. Spartan/XL Families FPGAs Data Sheet. Available online at http://www.xilinx.com
[22] http://lslwww.epfl.ch/biowall/
[23] http://www.villareuge.ch/
[24] http://www.poetictissue.org/