

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Band: 93 (2002)

Heft: 11

Artikel: Systèmes informatiques bio-inspirés

Autor: Stauffer, André / Mange, Daniel / Tempesti, Gianluca

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855421>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.11.2024

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

Systèmes informatiques bio-inspirés

BioWall: un tissu informatique pour le prototypage de systèmes bio-inspirés

Le Laboratoire de systèmes logiques (LSL) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) travaille déjà depuis plusieurs années dans la conception de systèmes matériels bio-inspirés. Les activités visent à conférer au matériel informatique certaines propriétés des organismes biologiques comme la croissance et la tolérance aux pannes notamment. La présente contribution décrit le projet *BioWall*, un tissu informatique reconfigurable qui constitue un outil de recherche précieux, du fait que sa faculté de reprogrammation et sa structure cellulaire s'adaptent parfaitement à l'implémentation de toutes sortes de systèmes bio-inspirés.

Pour illustrer les capacités du *BioWall*, les auteurs s'attacheront à la description de deux applications: la *BioWatch* et *Firefly 2D*. Outre ces deux exemples, d'autres applications telles que le *jeu de la vie*, des *boucles autorépliquatives*, le *problème du peloton d'exécution*, un

André Stauffer, Daniel Mange,
Gianluca Tempesti, Christof Teuscher

constructeur universel et un *réseau neuromimétique* ont été implémentées et testées matériellement dans le *BioWall* [1]. Elles reflètent différentes sources d'inspiration biologique allant des systèmes biologiques ontogénétiques¹ aux dispositifs évolutifs phylogénétiques², en passant par les réseaux neuromimétiques³ épigénétiques⁴.

Le nom *BioWall* du tissu informatique du LSL découle de son inspiration biologique, d'une part, et de ses dimensions, d'autre part. Conçu principalement comme une plate-forme de démonstration publique des propriétés des systèmes embryonniques⁵ par le truchement d'interactions tactiles et visuelles, son implémentation matérielle (fig. 1) atteint finalement les dimensions: $5,3 \times 0,6 \times 0,5 \text{ m} = 3,68 \text{ m}^3$.

Sur cette machine on a pu – pour la première fois – implanter dans le matériel un organisme doté de toutes les pro-

priétés d'une machine embryonnaire, telle qu'elle a été fréquemment définie dans la littérature. Cet organisme, la *BioWatch* (décrit plus loin), dont la fonctionnalité se résume à compter les heures, les minutes et les secondes, permet de démontrer les capacités de croissance et d'auto-réparation des systèmes développés à l'EPFL.

Comme le montrera la description technique de la machine, le *BioWall* est une plate-forme 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 applications répondant à cette description

sont nombreuses, en particulier dans le domaine des systèmes bio-inspirés. Les automates cellulaires, par exemple, constituent ainsi un environnement très courant dans le domaine de la recherche bio-inspirée [4]⁶.

Le BioWall

La réalisation de machines embryonniques demeure la raison principale qui se cache derrière la construction du *BioWall*. Leur structure est hiérarchique [2, 3]: les *organismes* (systèmes spécialisés) résultent de l'utilisation en parallèle de plusieurs *cellules* (petits processeurs), elles-mêmes implémentées sous forme d'un réseau de *molécules* (éléments logiques programmables).

Pour la réalisation matérielle de telles machines, la structure du *BioWall* correspond à un *tissu* bidimensionnel composé d'*unités* (représentant chacune une molécule), où chaque unité est constituée par un élément d'entrée (une membrane tactile), un élément de sortie (une matrice de $8 \times 8 = 64$ diodes électroluminescentes bicolores) et un élément de calcul programmable⁷ (fig. 2).

Le tissu représente une puissance de calcul considérable (3200 circuits FPGA⁸) couplée avec 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:

- la taille de l'affichage permet une interaction immédiate avec des applica-

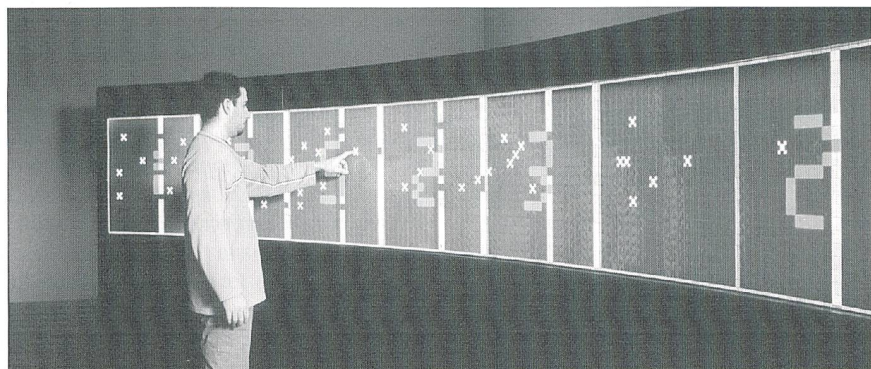


Figure 1 Vue frontale du *BioWall*
Implémentation *BioWall* de la *BioWatch* complète.

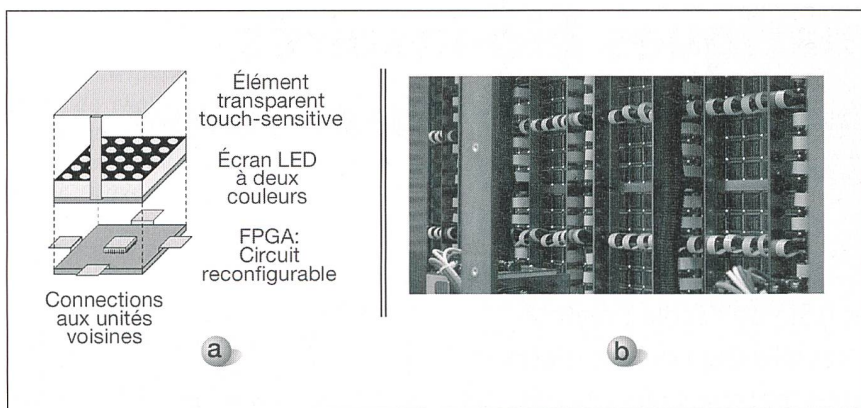


Figure 2 Représentation schématique

a: Une unité du *BioWall*; b: Vue partielle des circuits FPGA Xilinx. Le *BioWall* renferme 3200 unités, disposées en 20 rangées de 160 unités.

tions qui se limitent normalement à des simulations logicielles sur l'écran d'un ordinateur;

- la puissance de calcul et la faculté de reprogrammation inhérentes aux circuits FPGA permettent le prototypage de toutes sortes de systèmes bio-inspirés.

Pour le moment, chacun des circuits FPGA du *BioWall* ne peut être programmé qu'avec la même configuration, ce qui réduit la fonctionnalité des unités aux 10000 portes logiques équivalentes du circuit FPGA. D'autre part, 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 MHz⁹.

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 un PC ou directement avec des circuits conçus par l'utilisateur¹⁰.

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: 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 afin de les stocker sur disque ou de les utiliser directement.

Applications implémentées dans le *BioWall*

Comme mentionné dans l'introduction, le *BioWall* a été initialement conçu dans un but précis: la réalisation de machines ontogéniques définies conformé-

ment aux spécifications du projet Embryonique⁵. Les possibilités du *BioWall* ne se réduisent cependant pas à cette application. Sa structure cellulaire s'adapte en effet parfaitement à l'implémentation de toutes sortes d'applications bio-inspirées. Les deux applications présentées ci-après montrent comment le *BioWall* permet d'implémenter matériellement des inspirations biologiques découlant de deux des trois axes du modèle POE¹¹ [10]: phylogénèse (P), ontogénèse (O) et épigénèse (E). 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 fusionnement au sein d'un même système demeure un réel défi.

L'application *BioWatch*

Un exemple légèrement simplifié sert à illustrer l'implémentation de l'application *BioWatch* dans le *BioWall* [2, 3, 11]: tandis que la *BioWatch* complète est un organisme capable de compter les heures, les minutes et les secondes, l'application *Counter* (fig.3a) se limite au calcul des secondes. Le principe de fonctionnement des deux machines reste cependant identique.

Le compteur égrène les secondes de 00 à 59. 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 unité du *BioWall* est une *molécule* de la hiérarchie embryonique. Chaque cellule est ainsi une mosaïque de $20 \times 20 = 400$ molécules (fig.3b) et chaque cellule inclut deux colonnes de réparation ($2 \times 20 = 40$ molécules).

Le visiteur est maître de la «vie» de chaque molécule. Il peut insérer une faute dans n'importe quelle molécule par une simple pression du doigt sur la membrane de l'unité correspondante. Le dispositif de détection de faute, inclus dans la couche moléculaire, décèle l'erreur et active le mécanisme d'autoréparation 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'autoréparation implique qu'on ne peut supprimer qu'une seule molécule par ligne, entre deux colonnes de réparation. Si cette contrainte

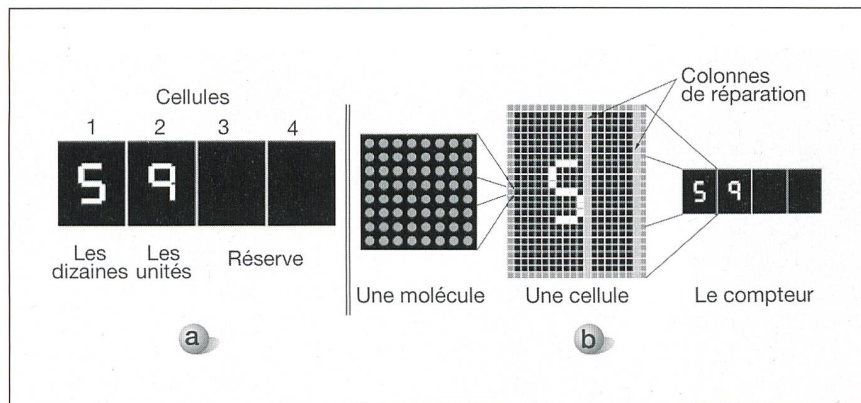


Figure 3 Fonctionnement du *BioWall*

a: L'organisme *Counter*; b: Implémentation *BioWall* de la hiérarchie embryonique.

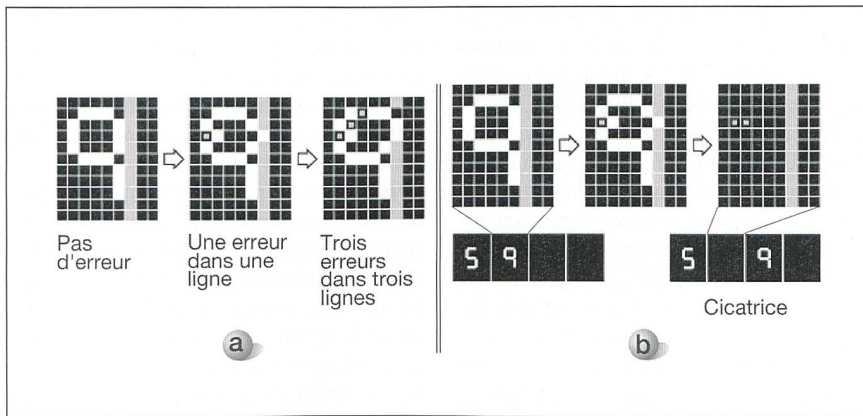


Figure 4 Autoréparation

a: Autoréparation moléculaire; b: Autoréparation cellulaire (elle s'effectue lorsque l'autoréparation moléculaire n'est plus possible; elle sauve le temps écoulé mais laisse une cicatrice).

est respectée, la cellule survit, au prix d'une déformation du chiffre affiché. Chaque cellule peut donc tolérer au plus deux fautes par ligne (une faute entre chaque paire de colonnes de réparation), c'est-à-dire $2 \times 20 = 40$ fautes au maximum.

Si la règle précédente est transgressée, plusieurs fautes étant insérées à la cellule sur la même ligne entre deux colonnes de réparation, l'autoréparation moléculaire n'est plus possible, et la cellule meurt. Cependant, la mort de la cellule n'implique pas la mort de l'organisme: elle est instantanément remplacée par une cellule de réserve située immédiatement à sa droite (fig. 4b). La cellule morte est éteinte, elle devient cicatrice. Il convient de noter qu'au cours de ce processus d'autoréparation cellulaire, le comptage du temps se poursuit imperturbablement: le tissu mémorise le temps écoulé et le sauve. De plus, un mécanisme de «résurrection» moléculaire sera prochainement implémenté: lorsqu'un nombre suffisant de fautes ont été supprimées (en pressant la membrane des molécules fautives), la cellule morte se réactive et recommence le comptage tout en assurant le sauvetage du temps écoulé.

Les capacités d'autoréparation des machines embryonniques sont basées sur le principe général d'organisation des êtres vivants, la *différentiation cellulaire* [11]. Chaque organisme est un assemblage de cellules contenant chacune une copie complète du programme génétique, le *génom*. 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 et naturels, la mort d'un nombre excessif de cellules n'autorise plus la répa-

ration, entraînant la mort de l'organisme. L'environnement «contrôlé» dans lequel opèrent les machines leur permet, en cas de mort de l'organisme, d'effectuer une réinitialisation complète du système, effectuant ainsi toutes les fautes injectées et donnant vie à une nouvelle machine en parfait état de marche.

L'implémentation de la *BioWatch* complète sur le *BioWall* (fig. 1) met en œuvre huit cellules comportant chacune 20×20 molécules et deux colonnes de réparation. Six des huit cellules sont actives en fonctionnement normal alors que les deux dernières servent de réserve pour remplacer une cellule morte. Toutes les propriétés du projet Embryonique ont été vérifiées matériellement dans cette implémentation.

L'application *Firefly 2D*

En 1997 déjà, le Laboratoire de systèmes logiques avait réalisé *Firefly* [8], un système matériel évolutif de programmation cellulaire, dans lequel les cellules d'un automate évoluent en parallèle pour résoudre un problème spécifique. Le problème 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*.

Alors que la machine *Firefly* originale résolvait le problème de la synchronisa-

tion 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 bidimensionnel¹².

L'implémentation bidimensionnelle *BioWall* matérialise un automate cellulaire non uniforme à deux états et cinq voisins (la cellule centrale et ses quatre voisins cardinaux), 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 *génom*, dont la longueur s'élève à $2^5 = 32$ bits. Au lieu de faire appel à une population d'automates cellulaires évolutifs, l'algorithme utilisé 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 également 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 $M+4$, 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

Le travail présenté dans cette contribution est partiellement financé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique FNS, la Fondation Leenards à Lausanne et la Villa Reuge à Ste-Croix. La communauté européenne – dans le cadre du programme *Information Society Technologies IST* – a mis à disposition des moyens en vue de la poursuite du développement du matériel bio-inspiré.

Le *BioWall* décrit dans cet article est actuellement exposé au musée de la Villa Reuge [12], où les personnes intéressées peuvent «jouer» avec la machine. Le Laboratoire de systèmes logiques met en outre sa machine à disposition d'autres groupes de recherche pour leur permettre de matérialiser leurs idées et leurs concepts.

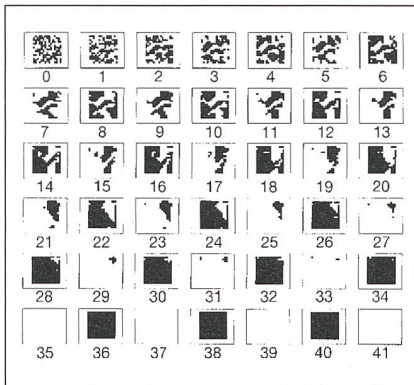


Figure 5 Problème de la synchronisation 2D

Automate cellulaire coévolué non uniforme à deux états et cinq voisins.

réalisé de manière locale car les opérations génétiques d'une cellule n'impliquent que la cellule elle-même et ses quatre voisins cardinaux. Ainsi, si son fitness est supérieur à celui des voisins, la cellule centrale conserve sa table. Lorsqu'un seul voisin présente un meilleur fitness, elle adopte la table de celui-ci. Lorsque plusieurs voisins surpassent son fitness, elle prend pour table une combinaison de leurs tables.

Contrairement aux algorithmes génétiques standard, dans lesquels une population de solutions au problème évolue de manière globale, notre approche repose sur un réseau de tables de règles qui coévoluent 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 de l'approche de type programmation cellulaire précédemment décrite dans le *BioWall* prouve qu'il est possible d'évoluer un automate cellulaire non uniforme, dans lequel l'état de toute cellule dépend de la cellule elle-même et de ses voisins cardinaux les plus proches, pour 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.

Conclusions

Les applications présentées dans cette contribution ne constituent qu'un petit

exemple des capacités du *BioWall*. 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 reprogrammation lui confère une remarquable souplesse d'emploi. Les interactions visuelles et tactiles du système constituent des supports incomparables pour la dissémination des idées et pour la vérification matérielle de concepts souvent réduits aux simulations logicielles.

Parmi les autres applications bio-inspirées déjà implémentées ou projetées, on peut citer, par exemple, les L-systèmes, les fourmis, les environnements proie-prédateur, d'autres espèces d'automates cellulaires et des réseaux neuromimétiques plus «conventionnels».

Le tissu POEtique

Depuis septembre 2001, en collaboration avec d'autres universités¹³, le Laboratoire de systèmes logiques à l'EPFL 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 de développement biologique: phylogenèse, ontogenèse et épigenèse.

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 fonctionnalités diverses, au même titre que les *cellules totipotentes* ou *cellules souches*¹⁴ dans les organismes vivants [1]. 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 créerons de la sorte des sous-structures semblables aux organes dans les organismes vivants.

Bien que le projet POEtique révélera 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 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.

Références

- [1] A. Stauffer, D. Mange, G. Tempesti, C. Teuscher: Le *BioWall* – Un tissu informatique pour le prototypage de systèmes bio-inspirés. *Flash Informatique de l'EPFL*, n° 4, pp. 1, 10–17, avril 2002.
- [2] D. Mange, M. Sipper, A. Stauffer, G. Tempesti: Towards Robust Integrated Circuits: The Embryonic Approach. *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 4, pp. 516–541, April 2000.
- [3] D. Mange, M. Tomassini: *Bio-Inspired Computing Machines*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1998.
- [4] A. Burks: *Essays on Cellular Automata*. University of Illinois Press, Urbana IL, 1970.
- [5] E. R. Berlekamp, J. H. Conway, R. K. Guy: *Winning Ways for your Mathematical Plays*. Vol. 2: Games in Particular, Academic Press, London, 1985.
- [6] J. von Neumann: *The Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana, IL, 1966.
- [7] A. M. Turing: *Intelligent Machinery*. Machine Intelligence, volume 5, pages 3–23. Edinburgh University Press, Edinburgh, 1969.
- [8] M. Sipper: *The Evolution of Cellular Automata: The Cellular Programming Approach*. Springer-Verlag, Berlin 1997.
- [9] Xilinx Corp. *Spartan/XL Families FPGAs Data Sheet*. Available online at <http://www.xilinx.com>
- [10] M. Sipper, E. Sanchez, D. Mange, M. Tomassini, A. Pérez-Urbe, A. Stauffer. A phylogenetic, ontogenetic, and epigenetic view of bio-inspired hardware systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 83–97, April 1997.
- [11] A. Stauffer, D. Mange, G. Tempesti, and C. Teuscher: *BioWatch: A giant electronic bio-inspired watch*. *Proceedings of the Third Nasa/DOD Workshop on Evolvable Hardware (EH-2001)*, pp. 185–192, IEEE Computer Society, Pasadena CA, 2001.
- [12] www.villareuge.ch

Adresses des auteurs

Prof. Daniel Mange, Laboratoire de systèmes logiques, LSL-FIC-EPFL, CH-1015 Lausanne
daniel.mange@epfl.ch

D^r André Stauffer, Laboratoire de systèmes logiques, LSL-FIC-EPFL, CH-1015 Lausanne
andre.stauffer@epfl.ch

D^r Gianluca Tempesti, Laboratoire de systèmes logiques, LSL-FIC-EPFL, CH-1015 Lausanne
gianluca.tempesti@epfl.ch

Christof Teuscher, Laboratoire de systèmes logiques, LSL-FIC-EPFL, CH-1015 Lausanne
christof.teuscher@epfl.ch

¹ Ontogenèse: développement de l'individu dirigé par son code génétique.

² Phylogenèse: développement des espèces au cours de l'évolution.

³ Réseaux neuromimétiques: réseaux de neurones artificiels.

⁴ Epigenèse: développement de l'individu à l'aide d'un processus d'apprentissage (système nerveux, système immunitaire) influencé à la fois par le code génétique (l'inné) et par l'environnement (l'acquis).

⁵ Projet Embryonique (embryologie électronique): projet de recherche qui s'inspire du processus de développement des êtres vivants en adoptant certaines caractéristiques de leur organisation cellulaire et en les transposant au monde artificiel du silicium afin de conférer des propriétés d'autoréplication et d'autoréparation aux circuits intégrés [2, 3].

⁶ Les automates cellulaires englobent (dans un ordre de complexité croissante) le *jeu de la vie* de John Conway [5], les *boucles autorépliquatives* développées initialement par Chris Langton et le *constructeur universel* de von Neumann [6]. D'autres exemples d'implantation de systèmes bio-inspirés sont les *réseaux neuromimétiques artificiels* développés par Alan Turing [7] et la réalisation bidimensionnelle de *Firefly* [8], une machine qui est conçue et construite pour démontrer la faisabilité de l'évolution matérielle en ligne.

⁷ Circuit FPGA Xilinx Spartan XCS10XL [9].

⁸ FPGA: field-programmable gate array.

⁹ Cette fréquence demeure plus qu'adéquate si l'on tient compte du parallélisme massif de la machine et elle reste considérablement trop élevée pour les interactions humaines dans la plupart des applications.

¹⁰ Les modules n'autorisent évidemment l'accès qu'à la périphérie du réseau mais, si cela s'avère nécessaire, les circuits FPGA peuvent être programmés de façon à assurer la propagation interne des signaux.

¹¹ Modèle POE: modèle des systèmes informatiques bio-inspirés regroupant les trois niveaux de développement des êtres vivants (la phylogenèse, l'ontogenèse et l'épigenèse).

¹² Les bases théoriques de l'extension d'une à deux dimensions du problème de la synchronisation sont présentées dans [8].

¹³ Université de York (Angleterre), Université polytechnique de Catalunya (Espagne), Université de Glasgow (Ecosse) et Université de Lausanne (Suisse).

¹⁴ Cellule souche: cellule capable de se reproduire en donnant une cellule identique à elle-même et une autre débutant le processus de différenciation qui permet aux tissus de l'organisme d'avoir des fonctions spécialisées.

Informatiksysteme nach Bio-Vorbild

BioWall: Ein Informatik-Gewebe zur Prototypenherstellung bei bio-inspirierten Systemen

Das Labor für Logiksysteme (LSL) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) arbeitet schon seit einigen Jahren an der Entwicklung von Hardware nach biologischem Vorbild. Es gilt dabei, der Informationshardware gewisse Eigenschaften biologischer Organismen, wie Wachstum und Pantoleranz, zu verleihen. Der vorliegende Bericht beschreibt das Projekt Bio Wall; es handelt sich dabei um ein rekonfigurierbares Informatikgewebe, das durch seine Umprogrammierbarkeit und Zellenstruktur, welche den Einsatz vielfältiger Systeme nach biologischen Vorbildern erlaubt, ein wertvolles Forschungsinstrument bildet.



LEM: führend in der Netzanalyse



ANALYST 3Q 

ANALYST 3Q – die schnelle Art Ihre Spannungsqualität zu analysieren

Die Spannungsqualität kann zum Problem bei der Energieversorgung in Ihrem Unternehmen werden. Deshalb muss der Elektro-Profi verschiedene Parameter genau analysieren.

- Die effiziente Lösung, wenn es darum geht, Netzprobleme zu erkennen und umgehend darauf zu reagieren
- 3 Geräte in Einem: 3phasiger Netzanalysator, Oszilloskop und Datenlogger
- Einfache und schnelle Datenanalyse mit einer beispiellosen statistischen Übersicht aller Parameter nach EN50160
- Robustes, tragbares Gerät mit langer Batterie-Lebensdauer – optimal für mobile Einsätze

Wenn Sie mehr über ANALYST 3Q und unsere Power Quality Produkte wissen wollen, rufen Sie uns an oder besuchen Sie unsere Webseite.

LEM ELMES

Tel.: 055/4 15 75 75, Fax: 055/4 15 75 55

E-mail: lel@lem.com

www.lem.com

LEM

Made to Measure

whp