

Chapitre 1

Prolégomènes

Entre
Ce que je pense,
Ce que je veux dire,
Ce que je crois dire,
Ce que je dis,
Ce que vous avez envie d'entendre,
Ce que vous croyez entendre,
Ce que vous entendez,
Ce que vous avez envie de comprendre,
Ce que vous comprenez,
Il y a dix possibilités qu'on ait des difficultés à communiquer.
Mais essayons quand même...

Bernard WERBER , *Le père de nos pères*

1.1 Réflexions pré-introductives

De tout temps l'homme s'est inspiré de la nature pour construire des machines, à la manière dont les oiseaux motivèrent les pionniers de la conquête des airs. Sur le plan des technologies de l'information, bien que les travaux de von Neumann sur les architectures des premiers processeurs visaient à créer un système capable d'imiter le comportement du cerveau, cette bio-inspiration n'y est que peu présente. Les microprocesseurs, qui sont aussi bien exploités par les ordinateurs et par les téléphones mobiles que par les machines à laver, n'embarquent pas de mécanismes semblables à ceux observés dans la nature.

Cependant, les systèmes aussi bien matériels que logiciels faisant intervenir des processus inspirés du vivant sont de plus en plus nombreux. A titre d'exemples, citons les réseaux de neurones artificiels qui analysent les adresses écrites à la main sur les lettres envoyées par la Poste, et la main artificielle de l'équipe d'Higuchi [116] qui s'adapte à son hôte : ces deux exemples ne sont qu'une infime partie de la recherche effectuée dans le domaine des systèmes bio-inspirés.

Mais pourquoi vouloir à tout prix s'inspirer du vivant ? Tout simplement parce que la vie est impressionnante de plasticité et d'adaptabilité. Depuis son apparition, il y a quelques milliards d'années, elle n'a cessé de se complexifier, jusqu'aux organismes que nous connaissons actuellement, en inventant sans cesse de nouvelles stratégies et de nouveaux systèmes. De plus, les capacités d'autoréparation du vivant sont impressionnantes. Alors qu'un ordinateur "plante" lamentablement si un seul des innombrables signaux qui le composent change subrepticement d'état, les organismes vivants peuvent survivre à des blessures ou aux maladies. Enfin, les capacités d'apprentissage des êtres dits supérieurs sont surprenantes, tandis que les machines peinent encore à tirer parti des expériences vécues, et à les généraliser.

1.2 Motivations POEtiques

Dans cette thèse, nous nous intéresserons particulièrement au modèle POE, qui vise à décrire les systèmes matériels bio-inspirés selon trois axes : Phylogénétique, relatif à l'évolution, Ontogénétique, pour ce qui est de la croissance et de l'autoréparation, et Épigenétique, en ce qui concerne l'apprentissage. Différentes applications peuvent mettre en oeuvre un, deux ou trois de ces axes, en fonction du problème à résoudre.

La phylogenèse traite, sur le plan du vivant, de l'évolution des espèces, et de la manière dont les gènes sont transmis des parents à la progéniture. Diverses théories coexistent, allant du néo-darwinisme au Lamarckisme, en passant par celle des équilibres ponctués et celle des monstres prometteurs. Elles ont inspiré des chercheurs qui en ont tiré le concept d'algorithme génétique, visant à résoudre un problème complexe pour lequel la solution ne peut être trouvée en un temps raisonnable par un algorithme déterministe. Le concept y est le suivant : une population d'individus représentés chacun par un génome est générée aléatoirement et les individus sont évalués puis sélectionnés selon un critère particulier au type de problème. La nouvelle population est alors réévaluée, et le cycle recommence jusqu'à approcher une solution acceptable.

L'ontogenèse concerne la croissance d'un organisme, d'un embryon à un individu adulte composé de dix mille milliards de cellules, dans le cas de l'être humain. Chaque cellule d'un être vivant contient un génome décrivant l'organisme entier, et servant à construire un corps, puis à le réparer en cas d'agression. Basé sur ce principe, le projet embryonique [142], développé au Laboratoire de Systèmes Logiques, a vu la naissance (si l'on peut dire) d'un nouveau concept de circuits électroniques réparables. Conçu pour implémenter des systèmes cellulaires sur la base de molécules électroniques, la mort de molécules et de cellules y est compensée par l'activation de parties de rechange du circuit.

L'épigenèse, quant à elle, traite de l'apprentissage d'un individu, qui à partir de connaissances acquises, et en fonction de l'interaction qu'il entretient avec son environnement, développe un réseau de neurones impressionnant. Dans le cas de l'homme, il s'agit d'environ 10 milliards de neurones, chacun possédant jusqu'à 10'000 connexions. Il est bien clair que notre cerveau est une phénoménale machine à apprendre, et à mémoriser. Par simple observation, puis imitation, nous sommes capables d'acquérir de nouveaux savoirs. Là encore les ingénieurs se sont inspirés de ce concept en développant les réseaux de neurones artificiels, qui sont entre autre mis à contribution dans des applications de reconnaissance de formes ou de contrôle de robot.



En comparaison des solutions logicielles, le matériel, de par son parallélisme intrinsèque, offre une accélération potentielle de tels systèmes, qui peuvent être gourmands en temps de calcul. Les circuits reconfigurables permettent d'embarquer des applications mettant en jeu ces différents axes du vivant, dans l'optique de disposer de plateformes matérielles bio-inspirées. Ils ne sont toutefois pas entièrement adaptés aux mécanismes tels que l'autoréparation et la plasticité. De là est né le projet européen dénommé "POEtic", dont le but était la réalisation d'un tissu électronique permettant l'implémentation efficace d'applications bio-inspirées incluant au moins un des trois axes présentés. Cette thèse s'est donc déroulée dans le cadre de ce projet de collaboration, où notre tâche principale fut de mener à bien la réalisation de la partie programmable du circuit POEtic, appelée sous-système organique. Nous tenons à citer ici les partenaires du projet, ainsi qu'une brève description de leurs tâches respectives :

- Le Laboratoire de Systèmes Logiques, où nous avons étudié divers systèmes ontogénétiques, et principalement défini le sous-système organique, qui se trouve être l'un des sujets principaux de la présente thèse.
- L'Université de Lausanne, où une équipe de neurobiologistes a défini un nouveau type de neurone à impulsion.
- Le Laboratoire de Systèmes Autonomes, de l'EPFL, où un système de codage morphogénétique, une alternative à la correspondance directe du génotype au phénotype, a été investigué. Une application robotique du réseau de neurones développé par l'Université de Lausanne utilisant le circuit POEtic y a également été réalisée.
- L'Université Polytechnique de Catalogne, où le microprocesseur ainsi que le layout électronique du circuit furent réalisés, sur la base des fichiers VHDL que nous leurs avons fournis concernant la partie reprogrammable. Ils réalisèrent également une implémentation matérielle du neurone défini par l'Université de Lausanne.
- L'Université de York, où un système immunotronique a été développé, de même qu'un mécanisme d'autoréparation cellulaire démontrant l'efficacité du circuit construit. Un outil d'édition schématique permettant de créer des designs pour POEtic y a également été réalisé.
- L'Université de Glasgow, sur l'axe mathématique, où le modèle de l'Université de Lausanne fut validé, grâce à une armada d'outils mathématiques.

Les circuits reconfigurables actuels, comme nous le verrons dans le chapitre 2, ne proposent pas de systèmes de routage dynamique permettant de connecter deux parties du circuit lors de l'exécution. En effet, leur structure est principalement composée d'éléments de base simples, reliés entre eux par un réseau d'interconnexions plus ou moins complexe. Ces connexions ne peuvent toutefois être programmées que par un contrôleur externe, lors de la configuration du circuit.

Les systèmes bio-inspirés, tels que les réseaux de neurones artificiels à topologie variable, peuvent nécessiter la création ou la destruction de connexions en cours de fonctionnement. De même, des systèmes montrant des propriétés de développement et d'autoréparation pourraient être réalisés, utilisant la propriété de création de connexions. Des cellules de rechange pourraient alors être dynamiquement reliées au système préexistant, en remplaçant des cellules dont le bon fonctionnement n'est plus assuré.

Les nanotechnologies, quant à elles, n'en sont qu'à leurs débuts, mais promettent de révolutionner la manière de concevoir des systèmes informatiques. Nous aurons,

dans un futur proche, des circuits moléculaires contenant un nombre plus que conséquent d'éléments qu'il faudra pouvoir programmer. Dès lors, les mécanismes développementaux pourront prendre toute leur importance, afin de créer des systèmes capables de s'auto-organiser, et de s'auto-réparer¹. La capacité de créer des chemins de données dynamiquement sera nécessaire, afin de disposer d'un maximum de flexibilité et de possibilités d'autoréparation.

Le manque de routage dynamique dans les circuits reconfigurables actuels et la nécessité d'en disposer dans les futurs nano-circuits nous amènent à explorer de nouvelles voies pour la réalisation de tels circuits. Il existe des algorithmes pour la découverte du chemin le plus court entre deux ou plusieurs points, la plupart étant séquentiels. Quelques solutions parallèles ont été proposées, mais aucune n'a encore été intégrée à un circuit reconfigurable. Cette thèse se propose donc d'explorer divers algorithmes pouvant être implémentés de façon parallèle, et d'en analyser les différentes caractéristiques.

Enfin, outre le routage dynamique, les systèmes bio-inspirés multicellulaires ont besoin, lors de phases de développement ou d'autoréparation, de pouvoir modifier le comportement des cellules qui le composent. Pour ce faire, le tissu électronique doit pouvoir s'auto-configurer, ce qui est une caractéristique inexistante dans les circuits reconfigurables commerciaux. Le sous-système organique de POEtic possède donc cette capacité, qui, couplée au routage dynamique, offre une plasticité matérielle aux applications qui y seront implémentées.

1.3 Contributions

Partant du constat que la possibilité de router dynamiquement des signaux dans les circuits reconfigurables actuels n'existe pas, la présente thèse apporte les contributions suivantes :

- Les systèmes de routage dynamique existants ont été étudiés et commentés.
- Un algorithme de routage matériel distribué a été proposé et implémenté, dans lequel aucun contrôle centralisé n'est nécessaire. Il est basé sur une implémentation parallèle de l'algorithme de Lee [137].
- Un second algorithme a été implémenté, réalisant la même fonction que l'algorithme de Mikami-Tabuchi [156], qui effectue une recherche par lignes.
- Une amélioration des deux précédents algorithmes a été réalisée, de manière à réduire non pas la longueur des chemins créés, mais plutôt les problèmes de congestion.
- Ces algorithmes, après avoir été implémentés pour un voisinage de 4, le furent pour les trois autres voisinages² réguliers à deux dimensions, à savoir 3, 6 et 8.
- Un dernier algorithme, n'exploitant que des liaisons locales afin d'améliorer la scalabilité du système, a également été réalisé.
- Une comparaison des différents algorithmes sur le plan du temps d'exécution, de la congestion, du nombre de transistors nécessaires et de la longueur des chemins a été effectuée, de manière à pouvoir proposer la meilleure alternative en fonction de différentes contraintes.

¹Les systèmes moléculaires seront très probablement plus sujets aux fautes que les implémentations actuelles sur silicium.

²Le voisinage désigne le nombre de voisines à laquelle une unité est reliée.



- Concernant la congestion, nous avons proposé un estimateur capable de l'approximer, de façon à pouvoir prédire les risques de congestion en fonction de plusieurs paramètres.
- De même, une comparaison des différents voisinages a été faite, afin de pouvoir choisir, en fonction notamment de la connectique et de l'espace disponible, la meilleure alternative.
- Basée sur un des algorithmes proposés, la partie reconfigurable d'un nouveau circuit, qui fut physiquement réalisé, a été conçue. Elle offre, outre les fonctionnalités standard des circuits reconfigurables FPGAs, des possibilités de routage dynamique et d'auto-configuration partielle. Ce système reconfigurable possède de nombreuses caractéristiques qui en font une plateforme idéale pour y implémenter des applications bio-inspirées multicellulaires.
- Un logiciel permettant à un utilisateur de réaliser un design pour notre circuit a été réalisé. Il permet de configurer les éléments de base de la partie reconfigurable, de les connecter entre eux grâce à une interface graphique, et de visualiser les résultats d'une simulation du design.
- La manière de tirer avantage des capacités spécifiques du circuits a été démontrée, en proposant une solution pour l'implémentation de registres à décalage et de compteurs générateurs d'impulsions.
- Un mécanisme de développement basé sur un identifiant cellulaire a été proposé, puis implémenté sur ce nouveau circuit.
- Une démonstration a été faite sur la manière d'utiliser ce circuit pour réaliser une application de matériel évolutif au niveau des portes logiques, ainsi que dans le cadre d'évolution non-contrainte.

1.4 Contenu de la thèse

Cette thèse est principalement divisée en 6 parties, outre cette introduction et la conclusion. Nous y présentons les systèmes bio-inspirés, puis les FPGAs et leurs limitations pour de tels systèmes. Le routage est ensuite introduit, avant d'entrer plus en détail dans les algorithmes développés dans le cadre de cette thèse. Finalement, un nouveau circuit reconfigurable, appelé POEtic, utilisant un de nos algorithmes de routage dynamique, est présenté, de même que différentes applications en démontrant l'utilité. La description succincte des chapitres est donnée ici :

- Le chapitre 2 présente les circuits reconfigurables (FPGAs, pour Field Programmable Gate Array) et leur évolution depuis les premiers circuits ne proposant que quelques portes logiques, jusqu'aux plus puissants FPGAs actuels qui exhibent des systèmes d'interconnexion des plus complexes. Leur limitation en terme de routage dynamique sera exposée, justifiant une partie de la présente thèse.
- Le chapitre 3 présente ce que sont les systèmes bio-inspirés, insistant sur les trois axes de la bio-inspiration, à savoir la phylogenèse, l'ontogenèse, et l'épigénèse. Il se termine par la présentation du projet POEtic, qui a pour but le développement d'un nouveau type de FPGA, un tissu POEtique, visant à faciliter l'implémentation d'applications bio-inspirées mettant en jeu des combinaisons des trois axes de la vie susmentionnés.
- Le chapitre 4 enchaîne tout naturellement sur le routage, en présentant les travaux déjà effectués sur des problèmes tels que la recherche du plus court chemin

entre deux points. Nous y introduisons les premières solutions logicielles, puis les systèmes matériels qui ont déjà été développés.

- En se basant sur les systèmes de routage présentés, le chapitre 5 introduit nos solutions. Les différentes architectures développées sont détaillées, et des tests de vitesse, de taille et de congestion sont effectués pour chaque algorithme, ainsi que pour les différents voisinages.
- Le chapitre 6 présente en détail l'architecture du circuit réalisé. Un accent particulier est mis sur la partie reconfigurable du circuit, qui fut développée dans le cadre de cette thèse. De plus, nous explicitons la manière dont certaines de ses caractéristiques peuvent efficacement implémenter certains composants de base tels que des registres à décalage ou des compteurs générateurs d'impulsions.
- Ayant défini le circuit, nous nous penchons, dans le chapitre 7, sur son efficacité quant à l'implémentation de mécanismes phylogénétiques, ontogénétiques, et épigénétiques. Ce chapitre démontre notamment l'utilité du routage dynamique et de la reconfiguration partielle.
- Finalement, la conclusion résume nos travaux, explicite les limitations du routage distribué et du circuit POEtic, et propose des extensions aux systèmes développés, qui pourraient être utiles à une potentielle deuxième version du circuit.