

Version abrégée

John von Neumann est considéré comme l'un des pères de l'ordinateur. Ce mathématicien d'exception a consacré les dernières années de sa vie à la théorie des automates. Ses recherches ont été inspirées par l'analogie existant entre les automates artificiels (dont l'exemple le plus important est l'ordinateur) et les automates naturels, tels que les systèmes nerveux, les organismes évolutifs, etc.

Grâce à sa théorie des automates, von Neumann a pu concevoir un ensemble de machines présentant des caractéristiques semblables à celles des systèmes biologiques: évolution, apprentissage, autoréplication et autoréparation. Au coeur de son approche, on retrouve le développement de machines autorépliquatives, c'est-à-dire capables de produire des copies d'elles-mêmes. Le travail présenté dans cette thèse est fortement inspiré par le fonctionnement de ce type de machines.

Cette thèse fait partie d'un projet de recherche plus général appelé Embryonique (ce nom est le fruit de la contraction des mots *embryologie électronique*). L'un des principaux buts de ce projet est de créer un pont entre le monde de la biologie et celui de l'électronique, et en particulier entre la biologie moléculaire et les systèmes digitaux. De plus, les travaux entrepris par les chercheurs du projet Embryonique visent à déterminer s'il est possible, avec la technologie moderne, d'envisager la construction physique d'une machine autorépliquative telle qu'elle avait été imaginée par von Neumann.

Les idées de von Neumann et l'étude de l'embryologie des êtres vivants ont conduit au développement de réseaux de processeurs, ou cellules, munies de la propriété d'autoréplication. La taille et la fonctionnalité de ces processeurs, qui sont des machines de décision binaire relativement simples, peuvent être déterminées de manière très simple. Cette propriété vient de l'utilisation de réseaux logiques reprogrammables à haute complexité, les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays). Ces réseaux offrent une surface homogène d'unités logiques universelles qui peuvent être reconfigurées à volonté de manière à implémenter n'importe quel circuit combinatoire ou séquentiel (dans la limite du nombre d'unités disponibles).

Ces dernières années, les circuits FPGA ont gagné énormément d'importance dans le domaine de l'informatique. Grâce aux progrès technologiques, la capacité et la complexité de ces circuits reprogrammables sont en continuelle progression. Parmi toutes les réalisations qui recherchent la puissance et la vitesse dans les circuits reprogrammables, l'approche de l'équipe de Cell Matrix semble se diriger dans une nouvelle direction. L'intérêt de ce circuit réside dans une structure complètement homogène

d'éléments identiques appelés cellules. Chacun de ces éléments participe activement au processus de configuration du circuit Cell Matrix dans son ensemble.

Certaines des idées de base de Cell Matrix sont analogues aux concepts qui animent le projet Embryonique. L'un des buts principaux de cette thèse est celui d'adapter et d'appliquer les caractéristiques d'autoréplication des cellules de Cell Matrix aux machines autorépliquatives du projet Embryonique. En parallèle, une deuxième approche d'autoréplication sera implémentée sur ce type de machines. Le développement et l'étude de ces deux systèmes autorépliquatifs nous permettra de les comparer et d'analyser l'efficacité de chacune des deux approches.

Une fois que ces deux approches autorépliquatives seront implémentées et réalisées physiquement à l'aide de circuits FPGA, une deuxième étape de cette thèse consistera à développer une logique embarquée pour l'autotest et l'autoréparation des éléments à la base de nos machines autorépliquatives. Un défi important a été imposé par le désir de minimiser la quantité de logique nécessaire pour ces fonctions tout en respectant les contraintes de l'inspiration biologique. Cette contrainte visant à minimiser la logique réalisant les fonctions d'autotest et d'autoréparation sera un outil fondamental qui permettra de comparer l'efficacité des deux machines autorépliquatives tolérantes aux pannes développées dans cette thèse.

Abstract

John von Neumann is considered as one of the leading figures in the development of computer engineering. This gifted mathematician dedicated the final years of his life on what he called the theory of automata. His research was inspired by the parallel between artificial automata (the most significant examples of which are computers) and natural automata, such as the nervous system, evolving organisms, etc.

Through his theory of automata, von Neumann conceived a set of machines capable of many of the same features as biological systems: evolution, learning, self-repair, and self-replication. At the core of his approach was the development of self-replicating machines, in other words, machines capable of producing identical copies of themselves. The systems presented in this thesis draw deeply inspiration from the functioning of these self-replicating machines.

This thesis is a part of a more general project called Embryonics (a contraction of the words *embryonic electronics*). One of the main goals of this project is to establish a bridge between the world of biology and that of electronics, and in particular between molecular biology and digital systems. Moreover, the works done by the researchers of the Embryonics project aim to determinate if, with the modern technology, von Neumann's dream of self-replicating machine can be realized in hardware.

Von Neumann's ideas and embryology studies on living beings led researchers of the Embryonics project to the development of a network of processors, or cells, endowed with self-replicating features. These processors, relatively simple binary decision machines, are remarkable in that they are easily parameterizable in both size and functionality. This property is derived from the use of high-complexity reprogrammable circuits, commonly referred to as Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs). These circuits provide a homogeneous surface of general-purpose logic elements which can be configured as often as desired to implement any combinational or sequential circuit (within the limits imposed by the number of available elements).

FPGA circuits have been gaining importance in the field of computer science. With technological and scientific progress, the capacity and complexity of such circuits are steadily increasing. Among the various concepts applied to this technology, the Cell Matrix approach seems to be going counter to conventional wisdom. The interest of Cell Matrix lies in its homogeneous structure: this circuit is made up of a regular two-dimensional grid of identical elements, referred to as cells. Each cell takes part in the configuration phase of the entire grid and ensures the functioning of the programmed circuit.

Some of the main ideas of Cell Matrix are analogous to the concepts of the Embryonics project. One of the main goals of this thesis is to use Cell Matrix self-replicating features together with the bio-inspired machines of the Embryonics project. Simultaneously, a second self-replication mechanism will be implemented in such bio-inspired machines. The development and the study of these two different self-replicating approaches will allow us to compare and analyze the efficiency of each mechanism.

Once these two self-replicating approaches are implemented and physically realized in a network of FPGA circuits, the second step of this thesis will consist in developing self-test and self-repair logic to embed in the basic bloc of our bio-inspired tissue. These modified basic blocs will compose our self-replicating machines. The main challenge in this area lied in the implementation of the desired features with the minimal amount of logic, while respecting the constraints imposed by our desire to follow a biological inspiration. These constraints will be a useful tool to compare the efficiency of the two fault tolerant self-replicating machines developed in this thesis.