

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER – BISKRA
FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE DEPARTEMENT DE
L'INFORMATIQUE



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
Doctorat LMD en Informatique

Option : Sciences et techniques de l'image

Créatures artificielles et ingénierie morphogénétique

Présentée par : **Rima HIOUANI** Devant le

jury composé de :

Pr. Med Chaouki BABAHENINI	Université de Biskra, Algérie	Président
Pr. NourEddine DJEDI	Université de Biskra, Algérie	Encadreur
Pr. Foudil CHERIF	Université de Biskra, Algérie	Examineur
Pr. Mohamed BENMOHAMED	Université de Constantine 2, Algérie	Examineur
Pr. Abdelouahab MOUSSAOUI	Université de Sétif, Algérie	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus vifs remerciements à mon Directeur de recherche, Pr. DJEDI Nouredine, pour son encadrement, sa disponibilité, son aide et ses conseils avisés et précieux.

J'adresse également mes remerciements et mes respects à mon co-Directeur français de l'université de Toulouse, Professeur Yves DUTHEN, qui avait un rôle important dans la réalisation de ce travail. Il m'a guidé, encouragé et il m'a fait confiance durant toutes ces années de recherche.

Je tiens à remercier les membres de jury pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail de recherche : Pr. Mohamed Chaouki Babahenini, Pr. Foudil CHERIF, Pr. Mohamed BENMOHAMED et Pr. Abdelouahab MOUSSAOUI.

Je tiens à remercier ceux que la vie m'a permis de rencontrer, en particulier mes ami(e)s de ma promotion pour leur aide et leur soutien, en particulier ma chère amie et collègue AKROUR Djouher pour son aide et ses efforts.

Je remercie également tous les professeurs qui m'ont enseigné et qui, par leurs compétences, m'ont encouragé et soutenu tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, j'aimerais remercier toute ma famille, à laquelle j'exprime toute ma gratitude. Je remercie particulièrement ma mère et mon père pour leur affection, amour inconditionnel, pour avoir toujours cru en moi et soutenu dans ce projet de thèse.

Merci à mon mari, celui que j'ai toujours trouvé à mes côtés. Il m'a soutenu et encouragé tout le temps. Je tiens aussi à remercier mes sœurs Fatima, Bouchra, Zoulikha, Hana et mes frères Taha et Younes pour leurs présences et encouragements.

À mes très chers parents, À
mon mari, et mes chers fils Mostafa et Ghayth

ملخص

بهدف محاكاة يعد تطوير المخلوقات الاصطناعية مجالاً متنامياً للبحث. لأكثر من ثلاثين عامًا، ظهرت العديد من التقنيات المخلوقات الاصطناعية على عدة مستويات. بدأنا بمحاكاة سلوكهم في أوائل التسعينيات ، ثم تابعنا من خلال تعديل مورفولوجياتهم حتى يتكيفوا مع بيئتهم. في الآونة الأخيرة ، تم استلهام عملية التطور الجيني الاصطناعي من آليات تطور الكائنات الحية من أجل تكوين كائنات صغيرة تحتوي على بضع عشرات إلى عدة مئات من الخلايا. الغرض من هذه الأنظمة هو من ناحية فهم الكائنات الحية بشكل أفضل ولكن أيضًا لإنتاج نماذج سلوكية للروبوتات المعيارية المستقبلية. في مجال الهندسة التشكلية ، يحاول الباحثون الانتقال من التنظيم الذاتي إلى التنظيم الذاتي الخالص. الحالة الأكثر لفتًا للنظر هي حالة التطور من ناحية أخرى لدينا نظرية بيولوجية مقترحة تحاول تعريف الجيني. يتميز هذا النظام البيولوجي بخاصية مورفوجينية قوية الخلق الذاتي للأنظمة الحية ، هذه النظرية اقترحتها علماء الأحياء ماتوراننا وفاريليا. اقترح هؤلاء نظرية التكوين الذاتي التي لذلك طبقنا هذه النظرية لتصميم تشير إلى أن الأنظمة الحية لديها القدرة على الإنتاج الذاتي والحفاظ على الذات وتجديد نفس عملية تكوين جيني اصطناعي كنظام تكوين ذاتي متعدد المستويات. حصلنا على خصائص الأحياء التي اقترحها ماتوراننا وفاريليا ، وهي الاستقلالية ، والخلق الذاتي ، والتنظيم الذاتي ، وكذلك التنوع والتطور. لقد اعتقدوا أن آلة التكوين الذاتي يمكن أن تسبب التطور والتنوع كعملية ثنائية لهذه الآلة. وبالتالي فإن نتائج نموذج النظام الذاتي متعدد المستويات الخاص بنا متوافقة مع اقتراحاتهم. من ناحية أخرى ، قمنا بتطوير مساهمة ثانية ، هذه المساهمة تتعلق باقتراح شبكة تحكم جيني الاصطناعي الموجود داخل الخلية ، والذي يتم إنشاؤه ذاتيًا وتنظيمه ذاتيًا

الكلمات المفتاحية : التنظيم الذاتي ، نظام التكوين الذاتي ، الهندسة التشكلية ، شبكة تنظيم الجينات الاصطناعية

Résumé

Le développement de créatures artificielles est un domaine de recherche en plein essor. Depuis plus de trente années, de nombreuses techniques ont émergé dans le but de simuler à plusieurs niveaux des créatures artificielles. On a ainsi commencé par la simulation de leurs comportements au début des années 90, on a ensuite continué en modifiant leurs morphologies pour qu'elles soient adaptées à leur environnement. Plus récemment, l'embryogenèse artificielles est inspirée des mécanismes de développement du vivant afin de générer de petites créatures possédant quelques dizaines à plusieurs centaines de cellules. Le but de ces systèmes est d'une part de mieux comprendre le vivant mais aussi de produire des modèles comportementaux pour de futurs robots modulaires. Dans le domaine de l'ingénierie morphogénétique les chercheurs tentent de passer de l'auto-organisation à la pure auto-organisation. Le cas le plus frappant est celui de l'embryogenèse. Ce système biologique se distingue par une forte propriété morphogénétiques ; cet auto-assemblage de nuées de cellules en anatomies animales et structures végétales extraordinairement détaillées. D'autre part, on a vu naître une théorie biologique proposé pour définir l'organisation et l'auto création des systèmes vivants, cette théorie est proposée par les biologistes Maturana et Varela. Ceux-ci ils ont proposé la théorie d'autopoïésis qui suggère que les systèmes vivants ont la capacité de s'auto-produire, de s'auto-entretenir et de se renouveler.

Nous avons donc appliqué cette théorie pour concevoir un processus d'embryogenèse artificielle en tant que système autopoïétique à plusieurs niveaux. Nous avons obtenu les caractéristiques du vivant suggérées par Maturana et Varela, à savoir l'autonomie, l'auto-crédation, l'auto-organisation, ainsi que la diversité et l'évolution. Ils pensèrent que la machine autopoïétique peut faire émerger l'évolution et la diversité comme un second processus de cette machine. Les résultats de notre modèle Multi Level Autopoietic system (MLAS) sont ainsi cohérents avec la suggestion de Maturana et Varela. D'un autre côté, nous avons développé une deuxième contribution, celle-ci concerne la proposition d'un GRN artificiel positionné à l'intérieur de la cellule, qui est auto-créé et auto-régulé.

Mots clés : . Auto-organisation, Système autopoïétique, Ingénierie morphogénétique, GRN artificiel, Evo-Devo.

Abstract

The development of artificial creatures is a growing subject of research. Many techniques have emerged in the last three decades in order to simulate artificial creatures on multiple levels : beginning with the modeling of their behavior in the early 1990s, we then progressed to adjust their morphologies so that they are adapted to their environment. Artificial embryogenesis, which is based on the development mechanisms of living organisms, has recently been used to create small creatures with tens to hundreds of cells. The goal of these systems is to improve our understanding of living systems while also developing behavioral models for future modular robots.

Researchers working in the subject of morphogenetic engineering are attempting to transition from self-organization to pure self-organization. Embryogenesis is the most striking example. This biological system is notable for its strong morphogenetic feature, which involves the self-assembly of swarms of cells into extremely precise animal and plant morphology. On the other side, biologists Maturana and Varela presented a biological theory to define the organization and self-creation of living systems. They proposed the theory of autopoiesis, which implies that living systems have the power to self-produce, self-maintain, and renew themselves. As a result, we used this theory to create a multilevel autopoietic system for artificial embryogenesis. We discovered the properties of living systems proposed by Maturana and Varela, including autonomy, self-creation, self-organization, diversity, and development. They thought that the autopoietic machine can bring evolution and diversity to emerge as a second process of this machine.

The results of our Multi Level Autopoietic System (MLAS) model are thus in line with Maturana and Varela's hypothesis. On the other hand, we have the second contribution, which is a proposal for a synthetic GRN to be placed inside the cell. This GRN is self-regulated and self-created.

Key words : Self-organization, Autopoietic System, Morphogenetic engineering, Artificial GRN, Evo-Devo.

Liste des publications

Conférences

1. Hiouani, R., Cussat-Blanc, S., Djedi, N. and Duthen, Y. (2017) ‘An autopoietic machine to achieve pure self-organization’, Morphogenetic Engineering Workshop’, at the European Conference on Artificial Life (ECAL), Lyon, September, pp 14-15.
2. Hiouani, R., Ouannes, N., Djedi, N., Duthen, Y. and Cussat-Blanc, S. (2016) ‘Intelligent cell using on-line GRN policy enzyme’, Morphogenetic Engineering Workshop’ (MEW 2016), at 15th International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems-ALIFE, July, Cancun, pp 12-13.
3. Rima, H., Cussat-Blanc, S., Djedi, N., Duthen, Y. (2017). A Multi-Level Autopoietic System to Develop an artificial Organism. Late-breaking abstract at the European Conference on Artificial Life (ECAL), Lyon, September,t, 9.

Revues

1. Hiouani, R., Djedi, N. and Duthen, Y. (xxxx) ‘A multi-level autopoietic system to develop an artificial embryogenesis process’, Int. J. Autonomous and Adaptive Communications Systems, Vol. x, No. x, pp.xxx–xxx.

Table des matières

Table des figuresIV

Liste des tableauxVII

1 Introduction générale12

1.1	Cadre de la thèse	12
1.2	Problématique	12
1.3	Contribution	13
1.4	Structure du mémoire	14

2 La vie artificielle et la bio-inspiration16

2.1	Introduction	16
2.2	La bio-inspiration	16
2.3	La vie artificielle	17
2.4	les créatures artificielles	19
2.4.1	La représentation de la morphologie des créatures artificielle.21	2.5
	Conclusion	31

3 L'ingénierie morphogénétique et la théorie de l'autopoiesis32

3.1	Introduction	32
3.2	L'ingénierie morphogénétique : modèle de processus dynamiques pour la morphogenèse	32
3.2.1	Systèmes biologiques qui montrent des architectures complexes	34
3.2.2	Systèmes créés par l'homme, architecturés et montrent aussi une auto-organisation	35
3.2.3	Vers une auto-organisation programmable	35
3.2.4	Regroupement de l'ingénierie morphogénétique à des catégories	37
3.2.5	Modèles de développement en IM.....	37

3.3	La vie, un système autopoïétique	41
3.3.1	Exemples	43
3.3.2	Modèle informatique de l'autopoïèse	45
3.4	Conclusion	51
4	Système autopoïétique à plusieurs niveaux	52
4.1	Introduction	52
4.2	Organisation multi-niveaux	52
4.2.1	Table des seuils	54
4.2.2	État de l'organe	54
4.2.3	Cellule souche	54
4.3	Le but du MLAS et ses différents individus autopoïétiques	55
4.4	Identités des individus	58
4.5	Le réseau cyclique de création (L'exécution du MLAS)	59
4.6	GRN artificiel booléen avec une partie épigénétique (MLAS au niveau de la cellule)	64
4.6.1	Première couche de régulation (FLOR)	65
4.6.2	Deuxième couche de régulation (SLOR)	66
4.6.3	Troisième couche de régulation (TLOR)	68
4.7	Conclusion	71
5	Résultats expérimentaux	72
5.1	Introduction	72
5.2	Paramètres de l'étude	72
5.3	Auto-régulation, auto-crédation et auto-organisation	73
5.4	Évolution et diversité comme deuxième processus de la machine auto-poïétique	77
5.5	Bilan	81
5.6	Discussion	82
5.7	Conclusion	83
6	Conclusion générale	84
	Bibliographie	87

Table des figures

2.1	Schémas de l'avion Eole issus du dépôt de brevet par Clément ADER.	18
2.2	Interprétation graphique du L-système. (source [DJEZZAR, 2010]).	22
2.3	Design évolutif de bâtiment à l'aide des L-Systèmes.....	23
2.4	Quelques exemples de créatures développées par Karl Sims à l'aide de Graphales et se déplaçant en utilisant un système de neurones.....	24
2.5	Quelques structures du jeu de la vie qui apparaissent spontanément.	26
2.6	Quelques structures de jeu de la vie initialisées avec une configuration donnée.....	26
2.7	illustrations du modèle de développement de Dellaert qui utilise un réseau booléen pour la régulation génétique.....	28
2.8	Exemples de courbes de concentration de protéines en fonction du temps, obtenues grâce au réseau de régulation de gènes de Banzhaf (source [Banzhaf, 2003]).....	29
2.9	Exemples de formes produites par le réseau de régulation de gènes de Flann. La première ligne montre la forme attendue, la ligne centrale montre le pattern obtenu après évolution du réseau et la dernière montre le réseau lui-même. [Flann et al., 2005]	30
3.1	« Physicaliser » l'information ou « informer » la physique. Quatre familles de systèmes représentant divers degrés sur les axes auto-organisation conception et architecture aléatoire. (source [Doursat et al., 2012])	33
3.2	Formes développées grâce au modèle de développement de Doursat [Doursat, 2009b]	38

3.3	Créatures développés. (a) un organe capable de transférer un substrat d'un point à l'autre. (b) Organisme auto-alimenté : coopération de 4 différents organes. (c) une étoile de mer artificielle. (c) méduse artificielle. [Cussat-Blanc et al., 2008]	40
3.4	Les éléments constitutifs essentiels de le modèle dit APLAUTOPOIESIS	46
3.5	des « instantanés » d'une histoire particulière d'une organisation autopoïétique équilibrée.	47
3.6	des « instantanés » d'une histoire particulière d'une organisation autopoïétique équilibrée.	48
3.7	Les éléments constitutifs essentiels du modèle dit APLAUTOPOIESIS	49
3.8	morphologies obtenues par le réseaux ontogénique proposé par [Agmon et al., 2016]	50
3.9	Les créatures obtenues par Model-S [Turney, 2020]	51
4.1	Le réseau cyclique de création des différents systèmes autopoïétiques (cellule, tissu et organe) et les différentes interactions entre eux.	53
4.2	L'initialisation du MLAS dans les différents niveaux. (a1) la structure du nœud de l'état de l'organe ; (a2) le GRN artificiel booléen et la table des intérêts présente à l'intérieur de la cellule souche ; (a3) le premier demi-cercle entre le nœud de l'état de l'organe et la cellule souche ; (a4) le deuxième demi-cercle entre la cellule souche et le nœud de l'état de l'organe ; (b) la table de seuil qui représente le niveau de construction requis pour chaque individu.	56
4.3	Organigramme qui décrit le processus d'exécution de l'algorithme de MLAS dans les différents niveaux des individus ; (a) machine autopoïétique de la cellule, (b) machine autopoïétique du tissu, (c) machine autopoïétique d'organe.	57
4.4	Les différentes identités des individus.....	59
4.5	L'exécution du premier demi-cercle de MLAS, (a) une partie de la table d'intérêt est active « colorée avec une couleur différente »	61
4.6	Le deuxième cycle du réseau de production du système autopoïétique d'organes	62

4.7	Les cellules contrôlées par le GRN artificiel booléen avec ses différentes couches de régulation. FLOR représenté par un groupe de signaux extérieurs, donne à la cellule des informations sur son environnement. Le SLOR est le deuxième niveau de réglementation ; contient un ensemble de gènes représentant toutes les actions cellulaires possibles. TLOR représenté par (1) (2) et (3), est le mécanisme de choix de l'action et de son évaluation.....	66
4.8	Le système mémoire à l'intérieur des cellules	70
5.1	A droite, différentes générations du développement de l'organe pour atteindre le Tableau des seuils. A gauche, le diagramme des actions des cellules exécutées dans le niveau du GRN booléen artificiel dans chaque pas du temps du processus de développement.....	76
5.2	Croissance de différentes créatures evo-devo dans différentes conditions environnementales, qui ont commencé par la même cellule. Chaque génération (G = Génération) représente le développement de l'organe multicellulaire qui commence par une seule cellule. Au cours des générations on a une évolution de la morphologie de l'organe multicellulaire.	78
5.3	Dans la partie gauche de la figure, différents organes se sont développés par MLAS avec différentes tables de seuils. Dans la partie droite, l'évolution des rapports individuels (I_R) pour chaque organe et tissu dans l'environnement.	80
6.1	Différentes machines autopoïétiques à des niveaux supérieurs.....	86

Liste des tableaux

4.1	Les valeurs des différent signaux dans FLOR	67
4.2	Les différentes actions de la cellule et le signal requis.....	67
5.1	Table des seuils. initialisation des seuils pour chaque tissu et organe.	73
5.2	Table d'intérêts. initialisation à l'intérieur de la cellule. W et H représentent respectivement la largeur et la hauteur de chaque tissu.....	73
5.3	Table des propriétés des environnements des systèmes de développement.	81
5.4	Table des propriétés des cellules des systèmes de développement.....	82
5.5	Table des capacités des systèmes de développement.	82

Introduction générale

1.1 Cadre de la thèse

Le développement des créatures artificielles fait l'objet de trente années de recherche. Il existe actuellement de nombreux modèles capables de simuler ces créatures artificielles à plusieurs niveaux différents. Certains utilisent des blocs et les connexions entre ces blocs pour construire de gros objets qui peuvent marcher, nager ou patiner dans leur environnement. Alors que d'autres utilisent des modèles pour simuler seulement un petit nombre de cellules, mais avec un réalisme extrême. L'objectif de ces modèles est de découvrir la morphologie, le contrôleur et les capacités des futurs robots modulaires. Dans le travail que nous présentons dans cette thèse, il s'agit d'une simulation de evo-devo cellulaire, on part d'une seule cellule ; où il est considéré comme un système autonome, à travers différentes générations ; Cette cellule doit auto-crée son code génétique et épigénétique comme un système autopoïétique, et à la fin de son évolution, elle doit pouvoir se développer et créer une morphologie architecturale.

Ce sous-domaine appelé embryogenèse artificielle a pour but de recréer le processus biologique de l'embryogenèse par la création des systèmes qui montrent une pure auto-organisation qui développe une architecture sans contrôle centralisé.

1.2 Problématique

Dans le monde où nous vivons, nous distinguons deux types de systèmes ; les systèmes naturels qui ont la capacité de s'auto-organiser et les constructions produites par le génie classique (mécanique, électrique, informatique et civil) qui ont un fonctionnement prévisible et déterministe. Ces derniers, se composent d'éléments hétérogènes assemblés de manière précise et compliquée. D'autre part, les systèmes

naturels auto-organisés se composent de plusieurs éléments ou agents identiques, tels que les grains de sable, les cellules ou les individus. Ces agents interagissent entre eux en suivant des règles simples et basiques pour faire émerger par la suite des comportements et des motifs complexes. Cela fait partie des systèmes complexes (SC) dont il n'y a aucune architecture intrinsèque. Les chercheurs [Doursat et al., 2012] ont proposé d'étudier la combinaison de ces deux systèmes. En d'autres termes, proposer des systèmes qui possèdent à la fois des caractéristiques des machines et des systèmes industriels créés par les humains, et des caractéristiques des systèmes complexes naturels. Les chercheurs ont nommé cette voie d'étude l'ingénierie morphogénétique [Doursat et al., 2012]. D'une autre part les biologistes Maturana et Varela défini la théorie de l'autopoïésis, cette théorie suggère que les systèmes vivants ont la capacité de s'auto-reproduire, de s'auto-entretenir et de se renouveler. Cette capacité nécessite la régulation de sa composition et la conservation de ses limites ; c'est-à-dire le maintien d'une forme particulière malgré l'entrée et la sortie de matériaux. Cette idée a été présentée au début des années 1970, comme une tentative de répondre à la question « qu'est-ce que la vie ? », ou « qu'est-ce qui distingue les êtres vivants des éléments non vivants ? La réponse était essentiellement qu'un système vivant se reproduit. Cette capacité d'auto-reproduction est ce qu'ils appellent l'autopoïèse. Ainsi, ils ont défini le système autopoïétique comme un système qui reproduit constamment de nouveaux éléments à travers ses propres éléments. L'autopoïèse implique que différents éléments du système interagissent d'une manière qui produit et reproduit les éléments du système.

Nous avons voulu étudier cette théorie et voir comment elle pourrait influencer les systèmes d'auto-organisation dans la vie artificielle, qui à la base été proposée pour définir l'organisation du système vivant et ses différentes caractéristiques. Sur la base de cette théorie, nous avons proposé un réseau d'auto-création et d'organisation avec des niveaux hiérarchiques pour développer une forme structurée d'organes sans contrôle externe ou central.

1.3 Contribution

Nous proposons deux contributions dans cette étude. La première consiste à proposer un nouveau type de système autopoïétique inspiré de la théorie de l'auto-poïèse. C'est un système autopoïétique à plusieurs niveaux ; c'est-à-dire une machine autopoïétique à l'intérieur d'une autre machine autopoïétique à trois niveaux. Le système autopoïétique en vie artificielle est souvent utilisé pour la création de membranes cellulaires, où la cellule autocrée sa propre membrane. Cependant, ce système n'est pas bien étudié dans l'auto-création de processus d'embryogenèse, dont la croissance commence par une seule cellule jusqu'à une morphologie complexe. En

effet, l'embryogenèse représente le processus d'auto-crétion le plus complexe en biologie.

Nous avons donc appliqué cette théorie pour concevoir un processus d'embryogenèse artificielle en tant que système autopoïétique à plusieurs niveaux. Nous avons obtenu les caractéristiques du vivant suggérées par Maturana et Varela, à savoir l'autonomie, l'auto-crétion, l'auto-organisation, ainsi que la diversité et l'évolution. Ils pensèrent que la machine autopoïétique peut faire émerger l'évolution et la diversité comme un second processus de cette machine. Les résultats de notre modèle sont ainsi cohérents avec la suggestion de Maturana et Varela.

La deuxième contribution concerne la proposition d'un GRN artificiel positionné à l'intérieur de la cellule. Le GRN proposé a la particularité de posséder des parties épigénétiques. Les travaux cités dans la littérature ont utilisé les algorithmes génétiques pour faire évoluer les paramètres du GRN artificiel. Cela signifie que le GRN qui contrôle le destin des cellules évolue hors ligne. La cellule dans ces modèles, n'est pas considérée comme une machine autopoïétique. Elle répond aux mêmes stimuli de la même façon. Si on a les mêmes conditions environnementales autour de la cellule et le même génome, la cellule répond de la même façon.

En effet, ceci n'est pas le cas en cellule biologique, dans lequel la cellule représente une machine autopoïétique. En d'autres termes, la cellule répond de différentes manières aux mêmes conditions environnementales et avec le même génome. Dans notre modèle, les cellules sont des machines autopoïétiques. Le GRN artificiel proposé dans notre étude évolue et s'autocrée de façon à permettre à la cellule de réagir différemment aux mêmes stimuli de l'environnement avec le même GRN artificiel.

1.4 Structure du mémoire

Le **premier chapitre** de cette thèse propose l'origine de la bio-inspiration. Il est important de comprendre l'historique de la bio-inspiration et comment cette ingénierie influence la vie artificielle ; ensuite dans ce chapitre on va présenter un bref état de l'art sur la vie artificielle et le développement de créatures artificielles. Nous présentons dans ce chapitre les techniques utilisées dans le développement de formes de créatures artificielles, commençons par les L-système et les Graphal, ainsi que les automate cellulaire et le jeu de la vie, ensuite, en étudiant l'embryogenèse artificielle, dans ce domaine les chercheurs utilisons des contrôleurs dedans chaque cellule (Les réseaux booléens aléatoires, Les réseaux artificiels de régulation de gènes) Au **chapitre suivant** on a présenté le nouveau domaine de recherche sur la morphologie ME « Morphogenetic engineering », ou les auteurs proposant de passé d'auto-organisation des créatures artificielles, à la pure auto-organisation, ou la création et l'organisation de la morphologie des créatures artificielle se fait sans contrôle de l'extérieur, c'est le

cas dans le processus de l'embryogenèse. Dans la deuxième partie dans ce chapitre, on discute une théorie biologique très intéressante, la théorie de l'autopoïésis, cette théorie est proposée par les deux biologistes Maturana et Varela, pour donner une définition de l'organisation des vivants, ces systèmes sont autoproducts, cette théorie de l'organisation de vivant est utilisée dans plusieurs domaines de recherche. A partir de cet état de l'art, nous avons voulu développer un modèle d'embryogenèse artificielle inspiré de la définition de la théorie de l'autopoïésis. Pour cela, nous avons imaginé un modèle de développement artificiel qui nous présentons dans le **troisième chapitre**. Basé sur une imitation de la théorie de l'autopoïésis et le but de ME, il permet de produire des organismes opérationnellement fermé dans le développement de son morphologie, ou ces organismes sont des unités autopoïétique dans ce processus de développement. Pour produire des organismes intéressants, ce modèle utilise l'organisation des systèmes autopoïétique, et un GRN dans chaque cellule. Le **chapitre 4** présente les différents organismes que nous avons obtenus grâce à MLAS 'Multi Level Autopoietic System' . Dans une première partie, nous allons exposer les expériences que nous avons réalisées ainsi que les résultats obtenus. Les expériences consistent à réaliser des simulations pour développer des structures en deux dimensions. Différentes formes d'organes ont été développées à l'aide du MLAS dans différentes conditions environnementales. Notre MLAS a réussi à créer différents individus en tant que machine autopoïétique dont lequel il a prouvé une capacité d'autorégulation, auto-crédation et une auto-organisation aux niveaux de ces machines. Chaque individu a pu créer et réguler ses composants à travers son réseau de composants de production en tant que organisation fermée. Enfin, dans le **dernier chapitre**, nous discutons comment cette théorie peut influencer les recherches futures dans l'origine de vie et la vie artificielle, et on a posé la question suivante : est-ce que la théorie de Darwin est juste un lien dans cette théorie?

La vie artificielle et la bio-inspiration

« *Tout art est une imitation de la nature* »

Sénèque.

2.1 Introduction

Les humains s'inspirent depuis longtemps des stratégies que les biologistes ont développées pour résoudre des problèmes ou découvrir de nouveaux outils. Du vol à la recherche de nouveaux matériaux, les exemples sont nombreux : matériaux super hydrophobes inspirés des feuilles de lotus, ailes d'avion inspirées des ailes d'oiseaux, etc.

Dans cette thèse, nous voulons générer des créatures en utilisant un système de développement. Essayer de comprendre le développement naturel pour en tirer une méthodologie est souvent très intéressant. Aussi dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'histoire de développement des créatures artificielles. Nous étudierons différents modèles en portant une attention particulière au développement cellulaire.

2.2 La bio-inspiration

La bio-inspiration est une nouvelle notion en ingénierie. Elle consiste à s'inspirer des phénomènes naturels pour trouver des solutions plus efficaces aux problèmes auxquels l'homme est confronté dans sa vie. Ainsi on a pu proposer des méthodes et des algorithmes intelligents avec des caractéristiques du vivant qui traitent les problèmes posés dans notre environnement par l'hyper-industrialisation de notre société comme la pollutions, le changement du climat, disparition de certains espèces, etc.

La bio-inspiration est appliquée dans plusieurs disciplines. On l'a trouve en particulier dans les domaines industriels tel que l'aéronautique, l'informatique, la robotique, l'intelligence artificielle et l'habitat.

En fait, bien que le concept de l'inspiration de la nature soit annoncé il y a quelques années, il a été présent bien avant la naissance de l'ingénierie et des technologies informatiques. Les êtres humains ont toujours observé le monde vivant. Ceci est dans le but de trouver des réponses aux problèmes auxquels ils sont confrontés depuis les temps anciens. A titre d'exemple utiliser la peau d'animaux avec fourrures pour maintenir la température corporelle ou fabriquer des outils de défense et de chasse pour sauver leur vie.

Au début du siècle dernier, l'ingénieur Français Clément Ader imagine et réalise des machines volantes bio-inspirées (voire la figure 2.1). Il dit en 1893 : « Le vol des oiseaux et des insectes m'a toujours préoccupé... J'avais essayé tous les genres d'ailes d'oiseaux, de chauve-souris et d'insectes, disposées en ailes battantes, ou ailes fixes avec hélice... je découvris l'importante courbe universelle du vol ou de sustentation. »

En proposant différentes approches et méthodes dans ce sens, on a pu obtenir rapidement de meilleurs résultats aux cours de ces dernières années. En effet, grâce aux techniques inspirées du vivant, on a pu concevoir les futurs systèmes robotiques que se soit au niveau macro ou au niveau micro. L'étude du vivant, ses origines et son fonctionnement est donc une des étapes principale à la conception des futurs bio et nano systèmes. De ce fait, l'inspiration de la biologie s'avère importante pour faire avancer le développement des technologies du futur.

La méthode bio-inspirée se déroule en 3 phases : [Rowe, 1991]

- En premier lieux, il faut observer et étudier la nature du point de vue d'un biologiste. Une fois le phénomène est observé, vient l'étape de la compréhension.
- Après avoir observer le phénomène biologique, il faut maintenant comprendre son processus du fonctionnement naturel. Il s'agit là de l'étape la plus importante pour permettre d'exploiter le cas naturel observé et de l'implémenter.
- Lorsque l'étape de la compréhension est terminée, il vient l'étape d'implémentation de ce qui a été observé sur des outils artificiels.

2.3 La vie artificielle

Au cours des vingt dernières années, plusieurs recherches ont été menées autour de l'étude et de la conception des systèmes artificiels. Ces derniers, ont comme objectif la reproduction du vivant que se soit au niveau comportemental ou au niveau des morphologies des organismes. Le domaine de la la vie artificielle (VA) a été créé en tant qu'un nouveau axe de recherches scientifique en 1987.

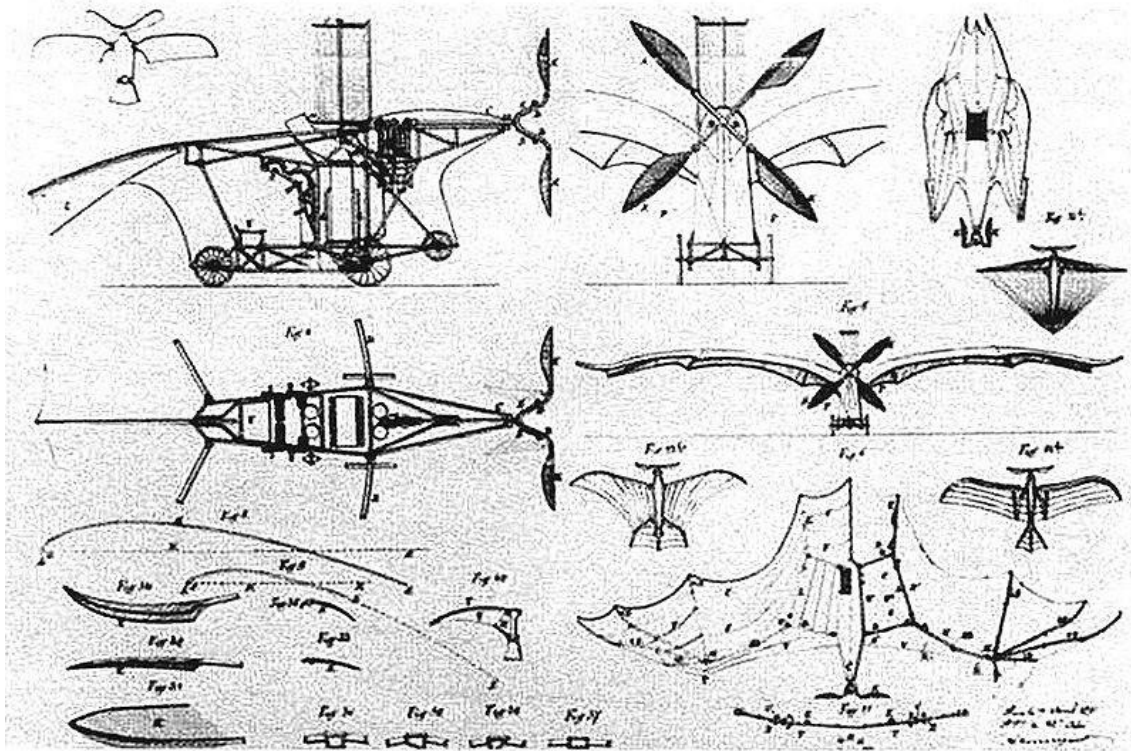


FIGURE 2.1 – Schémas de l'avion Eole issus du dépôt de brevet par Clément ADER.

La vie artificielle a été définie par Langton comme :

« l'étude de systèmes construits par l'homme qui présentent des comportements caractéristiques des systèmes vivants naturels ». [Langton, 1995]

En fait, l'émergence des calculs informatiques a marqué une nouvelle époque dans l'histoire de la vie artificielle. Les simulations informatiques ont désormais permis d'intégrer un certain nombre de phénomènes spécifiques du vivant comme le développement cellulaire ou la réplication.

Les travaux d'Alan Turing [Turing, 1990] sont ceux qui ont le plus influencé ce domaine. En effet, il a mis des bases mathématiques pour la génération de formes artificielles. Son système de réaction-diffusion a pu générer des motifs qui se ressemblent aux taches que nous pouvons distinguer dans la nature et dans la peau des animaux. Ceci était faisable par sa proposition du mécanisme d'interaction de deux produits chimiques.

John von Neumann [Neumann, 1966] s'est penché sur la problématique du fonctionnement des machines avec des capacités de reproduction et d'évolution tout en subissant des mutations. Il a inventé pour cela le "kinematon", qui est un automate cellulaire à deux dimensions qui a la capacité de construire n'importe quelle structure, à condition d'en avoir préalablement le plan de la structure. Avec ce dernier, l'automate va se répliquer jusqu'à en arriver à l'identique.

Par la suite, de nombreuses recherches dans différents domaines scientifiques ont été effectuées en utilisant des notions et des théories qui font partie, en quelque sorte, de la vie artificielle. Nous pouvons citer, par exemple, le jeu de la vie de John Conway [Gardner, 1970b] qui a permis l'émergence de dynamismes dans les automates cellulaires. En effet, ce travail fait partie des travaux qui ont utilisé les concepts de la vie artificielles (adaptation à l'image de l'évolution naturelle) avant même que la discipline ne soit née.

Après avoir effectué nombreux travaux dans cet axe de recherche, les chercheurs ont organisé une première conférence internationale en vie artificielle, en septembre 1987 dans les laboratoires de Santa Fe. L'objectif principal était de rassembler toutes les personnes travaillant sur la même problématique, mais de domaines variés. Les chercheurs aspiraient à développer des outils inédits et créatifs pour décrire, étudier et reproduire les différents phénomènes de la biologie. Ceci est fait bien évidemment en utilisant des ordinateurs et des simulateurs artificiels. En effet, à cet époque, on voulait à tout prix comprendre le vivant, et surtout s'inspirer de ses mécanismes et les appliquer lors de conceptions de nouvelles approches de l'ingénierie.

Chris Langton était l'organisateur de la conférence. Il a défini le cadre de recherche de la vie artificielle comme suit :

« Artificial life is the study of man-made systems that exhibit behaviors characteristic of natural living systems. It complements the traditional biological sciences concerned with the analysis of living organisms by attempting to synthesis life-like behaviors within computers and other artificial media. By extending the empirical foundation upon which biology is based beyond the carbon-chain life that has evolved on Earth, Artificial Life can contribute to theoretical biology by locating life-as-we-know-it within the larger picture of life-as-it-could-be. » [Langton, 1995]

Autrement dit, l'objectif de la vie artificielle est d'étudier les principes généraux de la vie de façon empirique par l'intermédiaire de trois approches : [Bedau, 1996]

- les systèmes auto-organisés, la génération spontanée de l'ordre, de l'émergence et de la coopération ;
- le métabolisme, l'autoreproduction et l'autopoïèse ;
- l'apprentissage, l'adaptation et l'évolution.

2.4 les créatures artificielles

« A chaque grande évolution technologique, les créatures artificielles ont participé à la mise en scène de la modernité en ayant recouru aux images mythiques »

Jean-Claude Heudin,

Le développement des créatures artificielles est un sujet de recherche étudié depuis la création de la discipline de la vie artificielle. On a commencé premièrement, vers les années 80 et 90, de proposer des simulation de comportement de créatures dont les morphologie sont prédéfinies. Dans ce cas, l'évolution agit seulement sur le comportement des créatures dans un environnement virtuel. En effet, ces travaux de simulations comportementales, ont été effectués dans le cadre des jeux vidéos et le cinéma pour l'animation de foules ou de films d'animation.[Pelechano et al., 2008] [Thalmann and Musse, 2012] Cependant, les simulations comportementales ont souvent été utilisées en robotique ces dernières années. L'objectif dans ce cas est de faire contrôler les articulations des créatures, qui peuvent être soit bipède, quadrupède ou hexapode, pour réaliser différentes tâches. Certaines créatures pouvaient alors réaliser des déplacements dans leur environnement [Cully et al., 2015] [Yosinski et al., 2011] [Ouannes et al., 2012], d'autres pouvaient réaliser des trajectoires tout en évitant les obstacles [Nelson et al., 2004] [Sanchez and Cussat-Blanc, 2014] et d'autres interagissaient avec l'environnement en prédateurs proies [Maes et al., 1996]. Pour cela, on a utilisé généralement des réseaux de neurones artificiels et des réseaux de régulation génétiques. On a aussi utilisé les algorithmes génétiques dans l'étape d'apprentissage.

Quelques années plus tard, les chercheurs ont commencé à concevoir des systèmes qui permettent d'évoluer simultanément la forme et le comportement des créatures. Les chercheurs ont fait en sorte que les créatures peuvent s'adapter à leurs environnements. Le principe est de concevoir une combinaison de morphologie et de comportement adéquate à l'environnement et à la tâche précisée par le concepteur. Karl Sims était le premier à proposer ce travail [Sims, 1994]. Ensuite, plusieurs chercheurs ont proposé différentes variations mais en gardant toujours le même principe [Krah, 2008] [Akrou et al., 2017] [Lessin et al., 2014]. On a obtenu donc des créatures intéressantes et complexes en termes de formes et de mouvements. Si les créatures sont confrontées à des environnements plus complexes, elles trouvent toujours des moyens créatifs pour s'adapter. [Lassabe et al., 2007] On a utilisé ici en grande partie les graphes pour la génération des morphologies, qui sera discuté en détail dans la prochaine section.

Alors que la simulation de comportement est étudiée qu'avec des formes prédéfinies, qui ne changent pas au cours du processus d'évolution, la morphogénèse permet de faire évoluer la morphologie et le comportement des créatures. Ceci permet de générer des créatures qui sont plus adaptées à leur environnement. En effet, cela est possible lorsqu'on cible les comportements de plus bas niveau, contrairement à la simulation de comportement qui va plutôt se focaliser sur le comportement global de

la créature. Cette évolution conjointe de la forme et du comportement permet de faire générer des comportement basiques avec des formes appropriés.

L'évolution de la morphologie nécessite une représentation logique de cette dernière, généralement via un codage génétique. En fait, il y a deux types principaux de codage de la morphologie : les grammaires et les graphes de développement. Ils seront présentés dans la partie suivante avec les créatures produites. Dans tout les cas, on a utilisé des algorithmes évolutionnaire pour faire évoluer soit, la morphologie, le comportement ou les deux à la fois dans un environnement virtuel.

Après cela, les chercheurs ont proposé un certain nombre de travaux qui s'appuie sur le développement cellulaire [Djezzar et al., 2011] [Joachimczak and Wróbel, 2012] [Eggenberger et al., 1997] [Ferreira et al., 2018]. Ils tentaient donc de produire des créatures via un processus partant d'une petite unité de base, qui est la cellule artificielle, et finissant par en arriver à la morphologie souhaitée. C'est en fait la conception de simulations de créatures qui évoluent au cours du temps. Dans ce cas, les chercheurs s'inspirent beaucoup du processus de développement cellulaire.

Après avoir fait évoluer simultanément la morphologie et le comportement et obtenu des résultats très encourageants. On a cherché à simuler le développement complet des créatures en se basant sur les phénomènes biologiques, et en particulier l'embryogenèse. [Doursat, 2009b] [Cussat-Blanc and Pollack, 2012] On tente donc de concevoir des créatures artificielles qui se développent à partir d'une cellule unique à l'image des êtres vivants naturels. Ce domaine s'appelle l'embryogenèse artificielle. Il se base généralement, à la fois, sur les automates cellulaires [Neumann, 1966], et sur les phénomènes biologiques qu'on peut observer dans la nature. Ainsi, il est possible de concevoir des modèles de développement qui peuvent générer diverses morphologies de créatures capable ou non de réaliser des comportements.

2.4.1 La représentation de la morphologie des créatures artificielle

L-Systèmes

Les L-systèmes (Lindenmayer-systems) [Lindenmayer, 1968] ont été proposé par Aristid Lindenmayer en 1968. Il s'agit d'un ensemble de règles et de symboles qui permettent la modélisation et la croissance d'être vivants comme les plantes et les cellules. En appliquant de manière répétitive les règles, on permet la réécriture des symboles et ainsi on peut obtenir des structures de végétaux dont la croissance se fait de façon exponentielle. En outre, les symboles sont interprétés par le programme pour dessiner des végétaux.

Les L-Systèmes, ils sont définis mathématiquement avec le triplet (V, w, P) où:

- **V** : représente un alphabet avec un ensemble finit de symboles non terminaux et terminaux.
- **W** : représente l'axiome ou le mot initial,
- **P** : représente l'ensemble des règles de production définissant les transformations.

Pour exécuter le L-système, il suffit d'appliquer de manière itérative et parallèle les règles de P sur V. Dans l'exemple suivant :

- $V = F, +, ,$
- $W = F$
- $P : F \rightarrow F + F F + F$

Les premières itérations génèrent :

Génération 1 : F

Génération 2 : F + F F + F

Génération 3 : F + F F + F + F + F F + F F + F F + F + F + F F + F



FIGURE 2.2 – Interprétation graphique du L-système. (source [DJEZZAR, 2010])

En associant une interprétation graphique à chaque symbole, on peut obtenir des formes géométriques variés. Cette interprétation peut concerner différents aspects visuels comme le tracé, l'orientation ou le déplacement. Elle s'appelle "la géométrie de la tortue" [Prusinkiewicz and Lindenmayer, 2012], en imaginant une tortue virtuelle qui se déplace dans un plan et laisse une trace derrière elle. En mettant la spécification suivante :

- F : tracer un segment et avancer d'une unité,
- + : tourner à gauche de l'angle $F = 60^\circ$,
- : tourner à droite de l'angle $F = 60^\circ$.

Le processus de génération est montré dans la figure 2.2. On peut obtenir donc diverses formes géométriques, mais généralement, on l'utilise pour la conception de plantes [Prusinkiewicz and Lindenmayer, 2012]. En outre, l'architecte Michael Hansmeyer a utilisé les L-système pour concevoir des architectures de bâtiments comme

illustré dans la figure 2.3 ¹. Pour en arriver à ce résultat, on a modifié les paramètres du L-Système et remplacé certains symboles par des fonctions mathématiques.

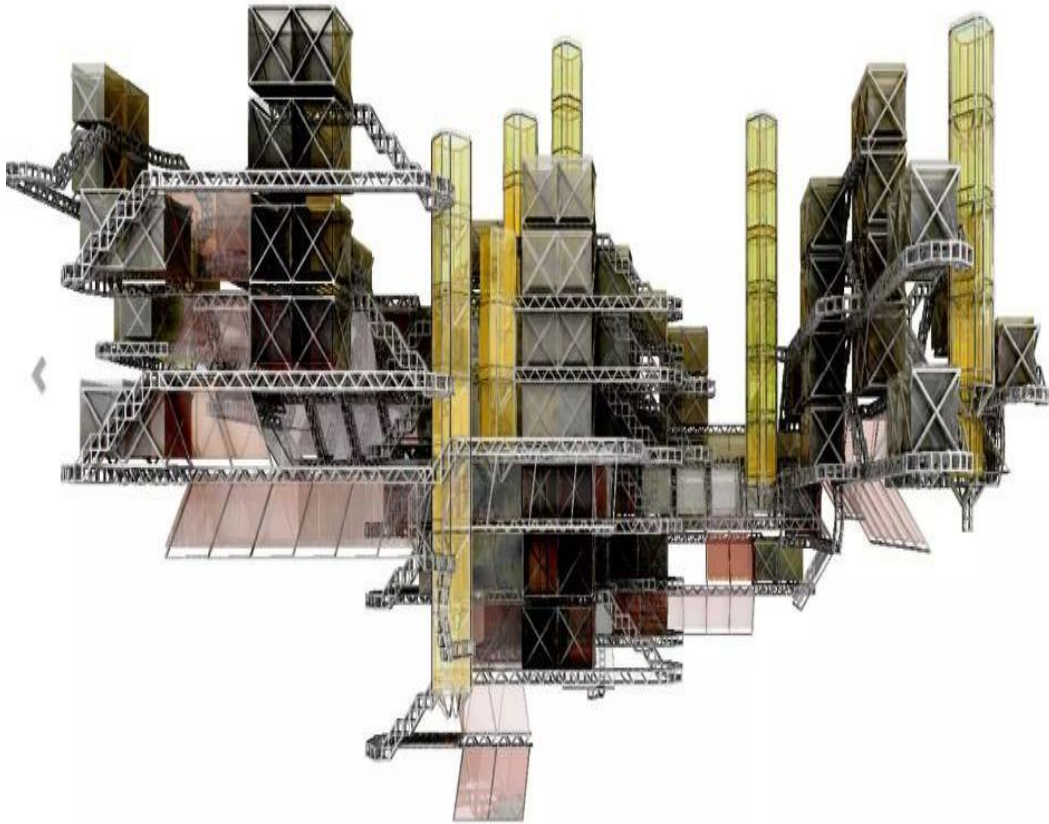


FIGURE 2.3 – Design évolutif de bâtiment à l’aide des L-Systèmes

Les graphales

Les graphales se sont des systèmes de développement de graphes, qui est traduit ou interprété pour le développement de créatures artificielles, qui se caractérisent généralement par des propriétés de récursivité et de symétrie.

Karl Sims [Sims, 1994] était le premier à proposer ce système en 1994. Il a défini ces réseaux de graphes comme suit : « *les nœuds du réseau représentent des blocs élémentaires de la créature avec leurs propriétés (forme, masse, capteur, couleur, etc.), les arcs entre les nœuds représentent les liaisons entre les blocs et le type de liaison qui les unit (fixe, rotation, élongation, etc.)* ». De cette manière, l’auteur a pu obtenir des morphologies de créatures très intéressante et très variés avec des graphes relativement simple et facile à exécuter.

1. <http://www.michael-hansmeyer.com/> (consulté le 12/07/2022)

Afin de pouvoir donner un aspect comportemental aux créatures, l'auteur a proposé de faire évoluer à côté de la morphologie, des réseaux de neurones artificielles pour contrôler les différents segments des créatures. Il a utilisé pour cela des algorithmes génétiques et en donnant un objectif bien précis aux créatures, celles-ci pouvaient apprendre à se déplacer de différentes façon selon l'environnement ou attraper un cube. Les créatures obtenues sont clairement bien adaptées à leurs environnement et aux problèmes qui leur est posé. Elles peuvent posséder par exemple des pattes, des bras, avoir une forme de chenille, ou encore développer des formes d'hélices pour se déplacer dans un liquide. La figure 2.4 montre quelques exemples de ces créatures. Il faut noter que, par la suite, les chercheurs ont trouvé des difficultés pour reproduire les travaux de Karl Sims. Néanmoins, différents modèles sont apparus, s'appuyant fortement sur ce modèle de graphales.



FIGURE 2.4 – Quelques exemples de créatures développées par Karl Sims à l'aide de Graphales et se déplaçant en utilisant un système de neurones.

Automate cellulaire

Les automates cellulaires ont été premièrement développé par Stanislav [Ulam, 1962] dans les années soixante. Se sont des systèmes dynamiques discrets qui modélisent des objets ayant une évolution parallèle synchrone.

En effet, les automates cellulaires représentent un système discret puisque le temps avance par pas et l'espace est sous forme d'une grille régulière de cellules. Chaque cellule peut choisir un état parmi un ensemble fini et qui a la possibilité d'évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au prochain pas de temps est déterminé selon un ensemble de règles de transition et aussi selon son état au temps présent, tout en tenant compte du voisinage. Ceci est répété à chaque pas de temps, et les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille.

Les états de toutes les cellules constituent l'état global de l'automate. Nous pouvons donc définir un automate cellulaire par un 4-uplets (N, V, W, Q) où :

- N : la dimension de la grille.
- V : le voisinage pris en compte.
- W : ensemble d'états de la cellule.
- Q : les règles de transition locales.

Nous remarquons que les automates cellulaires sont relativement simples dans leurs formalisations, mais ils peuvent faire émerger des comportements très complexes et chaotiques. Outre leur intérêt théorique comme modèle mathématique, leur complexité, induite par des règles locales élémentaires, permet l'étude de l'auto-organisation de phénomènes naturels. [Wolfram, 1983]

Jeu de la vie

Il est nécessaire de présenter ici le jeu de la vie, puisque nous avons évoqué les automates cellulaires. Le jeu de la vie a été proposé et développé par John Conway à la fin des années 60 [Gardner, 1970a]. Il a été ensuite popularisé par Martin Gardner [Gardner, 1970b]. Il est en fait, le plus populaire des automates cellulaires, puisque il présente des résultats surprenants, en appliquant sur de très simples règles. Des cellules peuvent ainsi naître, vivre et disparaître dans un espace de deux dimensions toroïdale.

Les cellules dans cet automate, possèdent chacune deux états, soit 0 ou 1, ou bien mort ou vivant d'où le nom de l'automate. Les cellules adjacentes définissent le voisinage d'une cellule, ce qui donne pour chaque cellule huit voisines.

En ce qui concerne les transitions d'état, on a défini deux règles élémentaires. En appliquant ces deux règles, l'automate fait émerger des structures variées. Elles sont présentées ci-dessous :

- Naissance : si une cellule morte est entourée de trois cellules vivantes, elle naît.
- Survie : une cellule vivante reste vivante à condition d'être entourée de deux ou trois cellules vivantes, autrement, elle meurt.

Généralement, partant d'une configuration aléatoire, on obtient des formations de motifs qui ont été classés en trois catégories : [DJEZZAR, 2010]

- Les blocs ou structures stables, c.à.d. des groupes de cellules qui n'évoluent plus comme illustré dans la figure 2.5 et dans les structures A-C),
- Les oscillateurs ou structures périodiques, qui peuvent retourner à leur forme originelle après un certain nombre de pas du temps. Par exemple le "clignotant" de la figure 2.5D),
- les vaisseaux spatiaux, sont des oscillateurs qui se déplacent au cours de leur cycle (comme le "planeur" ou "glisseur" de la figure 2.5E).

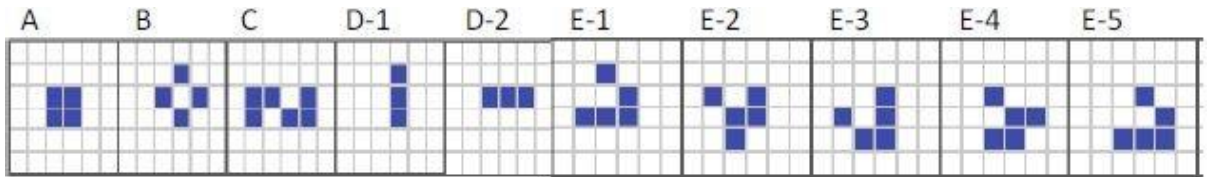
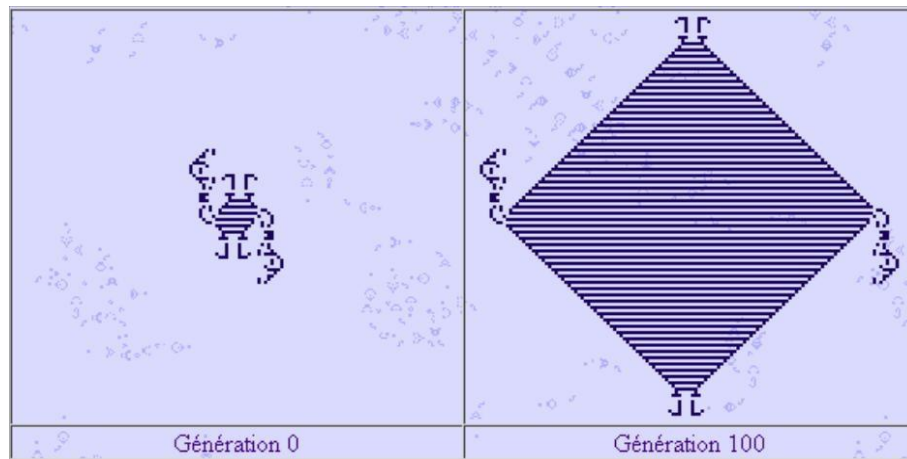
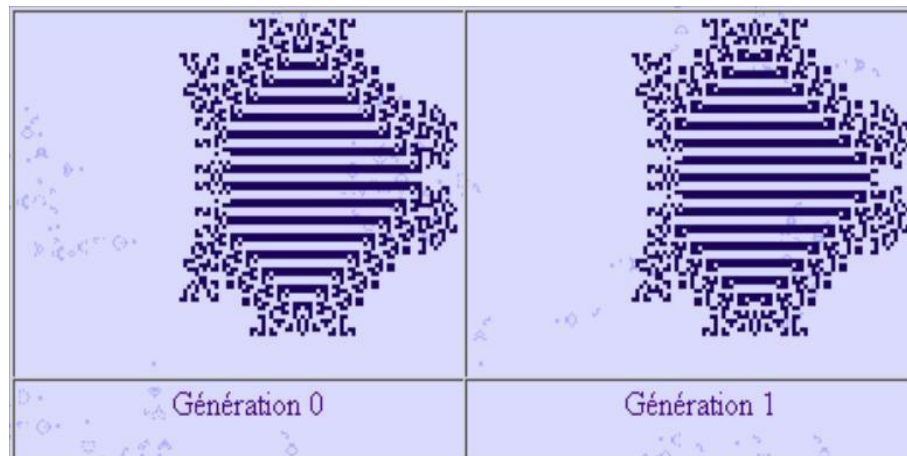


FIGURE 2.5 – Quelques structures du jeu de la vie qui apparaissent spontanément.

Les chercheurs ont pu obtenir des formes plus complexes que celles présentées en haut. Nous citons par exemple les “canons à planeurs” qui émettent un planeur à un rythme régulier ou la “locomotive à vapeur” qui se déplace dans l’automate en laissant une traînée de cellules vivantes sur son chemin. Il y a aussi d’autres structures, qui n’apparaissent pas spontanément comme “le recouvreur de plan” ou “le store vénitien” (figure 2.6).



(a) Le recouvreur du plan, la figure initiale recouvre petit à petit le plan d’une configuration stable.



(b) Le store vénitien, un vaisseau de période 2

FIGURE 2.6 – Quelques structures de jeu de la vie initialisées avec une configuration donnée.

Les réseaux booléens aléatoires

Dans le but de simuler la spécialisation cellulaire, Kauffman [Kauffman, 1969] a proposé les réseaux booléens aléatoires (RBN pour Random Boolean Network en anglais).

Un RBN est un réseau qui se compose de nœuds et d'arcs. Les nœuds possèdent chacun un état booléen, soit actif ou inactif. Les arcs, quant à eux, relient les nœuds tout en représentant des fonctions booléennes. Par ailleurs, l'état du système dans le prochain pas de temps dépend de ces fonctions booléennes appliquées aux valeurs des nœuds au temps présent. Pour interpréter le réseau de régulation, on considère que chaque nœud du réseau représente un gène et l'état de ce nœud représente son activation ou son inhibition. Cela signifie que la transcription génome qui détermine la fonction finale de la cellule.

Dellaert [Dellaert and Beer, 1994] a réalisé un modèle de développement en utilisant un réseau booléen en tant que réseau de régulation génétique pour le contrôle de spécialisation des cellules. Les cellules ont été simulées dans une matrice bidimensionnelle, ce qui permet une division simple de cellules. Dans ce travail, la créature commence à se développer à partir d'une seule cellule qui occupe toute la grille, et lorsqu'elle se spécialise et se divise, la grille se sépare en deux parties horizontale ou verticale. Cependant, c'est le réseau de régulation qui détermine le sens de séparation. C'est ainsi que les cellules se spécialisent, et cela en changeant de couleur. Afin d'arriver à atteindre la morphologie désirée, l'auteur a utilisé un algorithme génétique pour permettre l'évolution du réseau de régulation. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure numéro 2.7 avec un comportement de division et de spécialisation en fonction de la forme à réaliser. [Cussat-Blanc, 2009a]

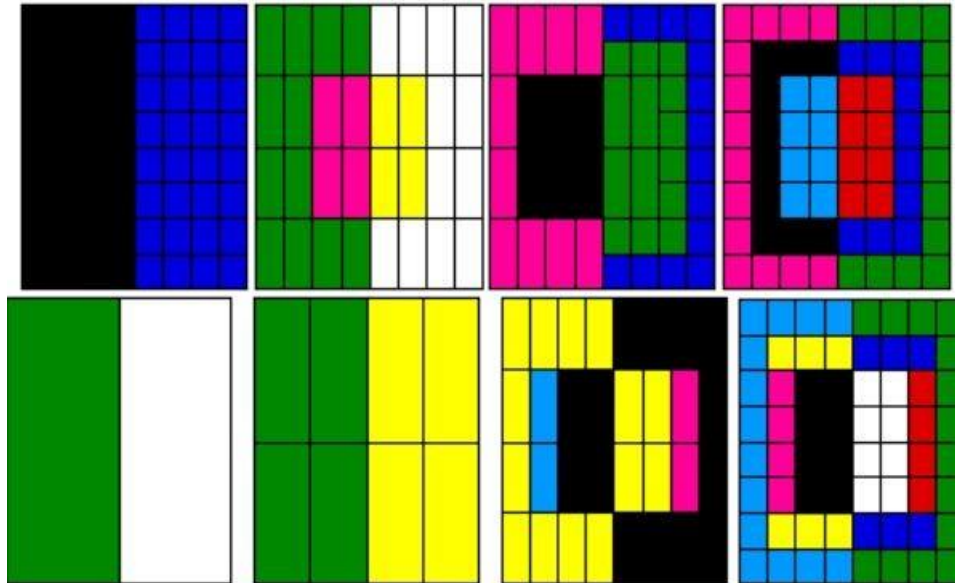


FIGURE 2.7 – illustrations du modèle de développement de Dellaert qui utilise un réseau booléen pour la régulation génétique.

Les réseaux artificiels de régulation de gènes

L'embryogenèse est l'étude du processus de développement des organismes multicellulaires. Son objectif en vie artificielle est la simulation de ce processus de spécialisation et de division cellulaires. Les chercheurs ont beaucoup étudié cette problématique. Ils ont utilisé dans la plupart des cas les réseaux de régulation de gènes [Davidson, 2010] (GRN pour Gene Régulation Network en anglais).

Nous remarquons dans la nature, chez les organismes vivants, différents types de cellules avec différentes fonctionnalités. Ce qui détermine le type et la fonction de la cellule est son code génétique et aussi son réseau de régulation de gènes. Par ailleurs, les cellules réagissent aux stimulus de l'environnement extérieur avec leurs récepteurs protéiques. Le GRN, qui est également décrit dans le code génétique de la cellule, réagit à ces stimulus pour activer ou inhiber la transcription de certains gènes. L'expression de ces gènes dans la cellule fille permettra de donner ses différentes capacités.

L'un des premiers travaux réalisés dans ce sens est celui de Torsten Reil [Reil, 1999]. L'auteur s'est inspiré donc de la biologie pour concevoir un modèle de réseaux de régulation de gènes. Il a représenté le génome des cellules par une suite de nombres.

En biologie, on a remarqué que chaque gène commence par une séquence spécifique qui est le promoteur. C'est le bloque TATA (T=Thymine et A=Adénine). C'est ce que l'auteur a appliqué dans son modèle, en débutant chaque gène par la séquence 0101. Ensuite, les bits qui suivent le promoteur définissent le gène lui-même.

Afin de visualiser comment le GRN fonctionne et comment les gènes s'activent ou se désactivent au cours du temps, l'auteur a proposé de les dessiner en graphes. En générant à chaque fois des GRN aléatoires, on a pu observer différents patterns comme un certain ordonnancement de l'activation des gènes, des expressions chaotiques ou la formation de cycles. L'auteur affirme qu'on retrouve toujours le même pattern d'expression après une certaine période d'oscillation. Ceci même en cas aléatoires dans le génome. [Cussat-Blanc, 2009a]

Quelques années plus tard, Wolfgang Banzhaf a proposé un autre modèle de réseau de régulation artificiel [Banzhaf, 2003], toujours en l'inspirons de la biologie et des réseaux de régulations génétiques.

L'auteur a codé les génomes en chaînes de caractères de 32 bits. Chaque gène du génome débute par un promoteur dont la séquence est "XYZ01010101" avec XYZ une séquence quelconque de bits complétant l'entier. Il faut savoir que dans ce travail, la probabilité d'apparition de la séquence "01010101" est d'environ 0.39%, et cette séquence est toujours de taille fixe, soit cinq entiers. La fonctionnalité des deux premiers entiers est de coder la production de protéines et donc la régulation génétiques. Dans ce cas, une protéine pour l'activation et une autre pour l'inhibition.

Dans son travail, Wolfgang Banzhaf, s'est focalisé uniquement sur la régulation des gènes. Le type de génome utilisé permet d'obtenir une évolution différente de la production des protéines au cours du temps, comme illustré sur les courbes de la figure 2.8. Comme nous pouvons voir, à chaque fois on obtient des courbes différentes, lorsqu'un génome est généré aléatoirement, et ensuite exprimé en fonction de l'état des gènes (activé ou inhibé). [Cussat-Blanc, 2009a]

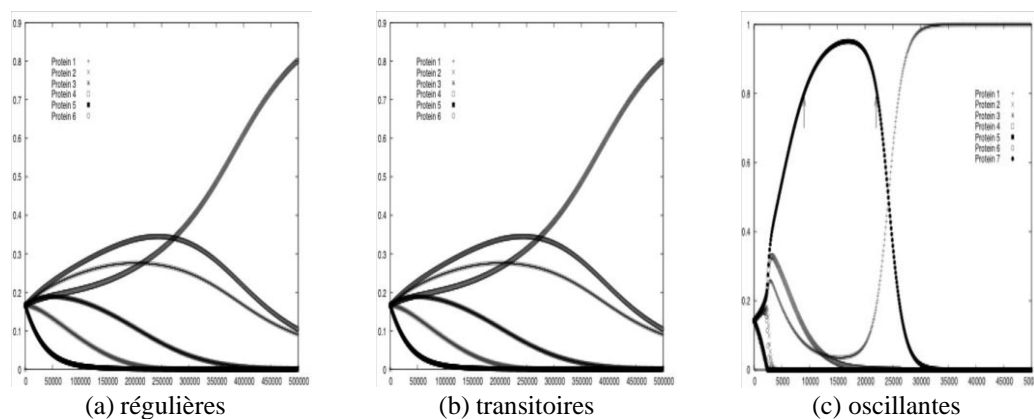


FIGURE 2.8 – Exemples de courbes de concentration de protéines en fonction du temps, obtenues grâce au réseau de régulation de gènes de Banzhaf (source [Banzhaf, 2003])

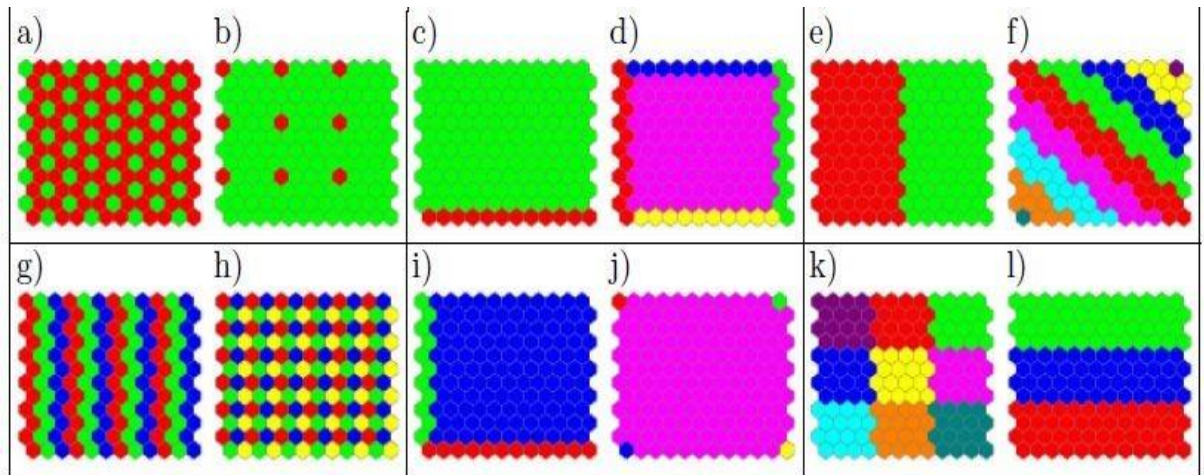


FIGURE 2.9 – Exemples de formes produites par le réseau de régulation de gènes de Flann. La première ligne montre la forme attendue, la ligne centrale montre le pattern obtenu après évolution du réseau et la dernière montre le réseau lui-même. [Flann et al., 2005]

Ensuite, il y a quelques chercheurs qui se sont appuyés sur ces deux derniers travaux pour proposer des modèles plus fonctionnels, et d'utiliser les réseaux de régulation génétiques pour résoudre de spécifiques problèmes. Nous citons, à titre d'exemple, le travail réalisé par Bongard et Pfeifer [Bongard and Pfeifer, 2003] qui ont utilisé un modèle similaire de celui de Reil [Reil, 1999] pour développer un robot modulaire.

Les auteurs ont conçu un contrôleur à base des réseaux de neurones artificiels pour contrôler le comportement du robot. Ici, le comportement, il s'agit du déplacement de chaque module. Les modules, à l'image des cellules, peuvent réaliser différentes fonctions fixées préalablement, tel que la division, l'augmentation la taille, la modification de paramètres et de la topologie des réseaux de neurones. En tout, l'expression de l'activation et de l'inhibition génétique permet d'activer ou d'inhiber 23 transformations phénotypiques.

Les chercheurs Flann et ses collègues [Flann et al., 2005] ont développé des images composées de cellules spécialisées, en utilisant des réseaux de régulation génétique implémenté sous formes de graphes. Comme illustré dans la figure 2.9, les nœuds représentent les différents niveaux d'expression des protéines, et les arcs qui relient les nœuds représentent les interactions entre les protéines. Dans ces travaux, afin d'obtenir des formes complexes, il a fallu en utiliser plusieurs en parallèle en combinant les niveaux de concentration de protéines. Nous notons que la spécialisation des cellules est mise en exergue grâce à la couleur de celle-ci. [Cussat-Blanc, 2009a]

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux processus de développement des créatures artificielles et en particulier le développement cellulaire. Nous avons étudié différents modèles se trouvant dans la littérature dans le but de concevoir notre propre modèle. Dans le prochain chapitre nous allons présenter le domaine de la l'ingénierie morphogénétique et le concept de l'autopoèse.

L'ingénierie morphogénétique et la théorie de l'autopoiesis

3.1 Introduction

Deux concepts sont très importants dans le développement des organismes cellulaires de manière autonome, qui sont l'ingénierie morphogénétique et la théorie de l'autopoïèse. Ils feront l'objet de ce chapitre.

3.2 L'ingénierie morphogénétique

Les chercheurs [Doursat et al., 2012] ont proposé d'étudier la combinaison de deux systèmes différents. Le premier système concerne les systèmes naturels qui ont la capacité de s'auto-organiser, et le deuxième concerne les systèmes produits par le génie classique (mécanique, électrique, informatique et civil) qui ont un fonctionnement prévisible et déterministe. Ces derniers, se composent d'éléments hétérogènes assemblés de manière précise et compliquée par leur constructeur. Dans l'autre part, les systèmes naturels auto-organisés sont composés de plusieurs éléments, comme les cellules ou les individus. Avec des règles simples, ces agents peuvent faire émerger des comportements et des motifs complexes, où il n'y a aucune architecture intrinsèque (figure 3.1a, figure 3.1d).

En d'autres termes, ces chercheurs ont proposé des systèmes qui possèdent à la fois des caractéristiques des machines et des systèmes industriels créés par les humains, et des caractéristiques des systèmes complexes naturels. Les chercheurs ont nommé cette voie d'étude l'ingénierie morphogénétique [Doursat et al., 2012].

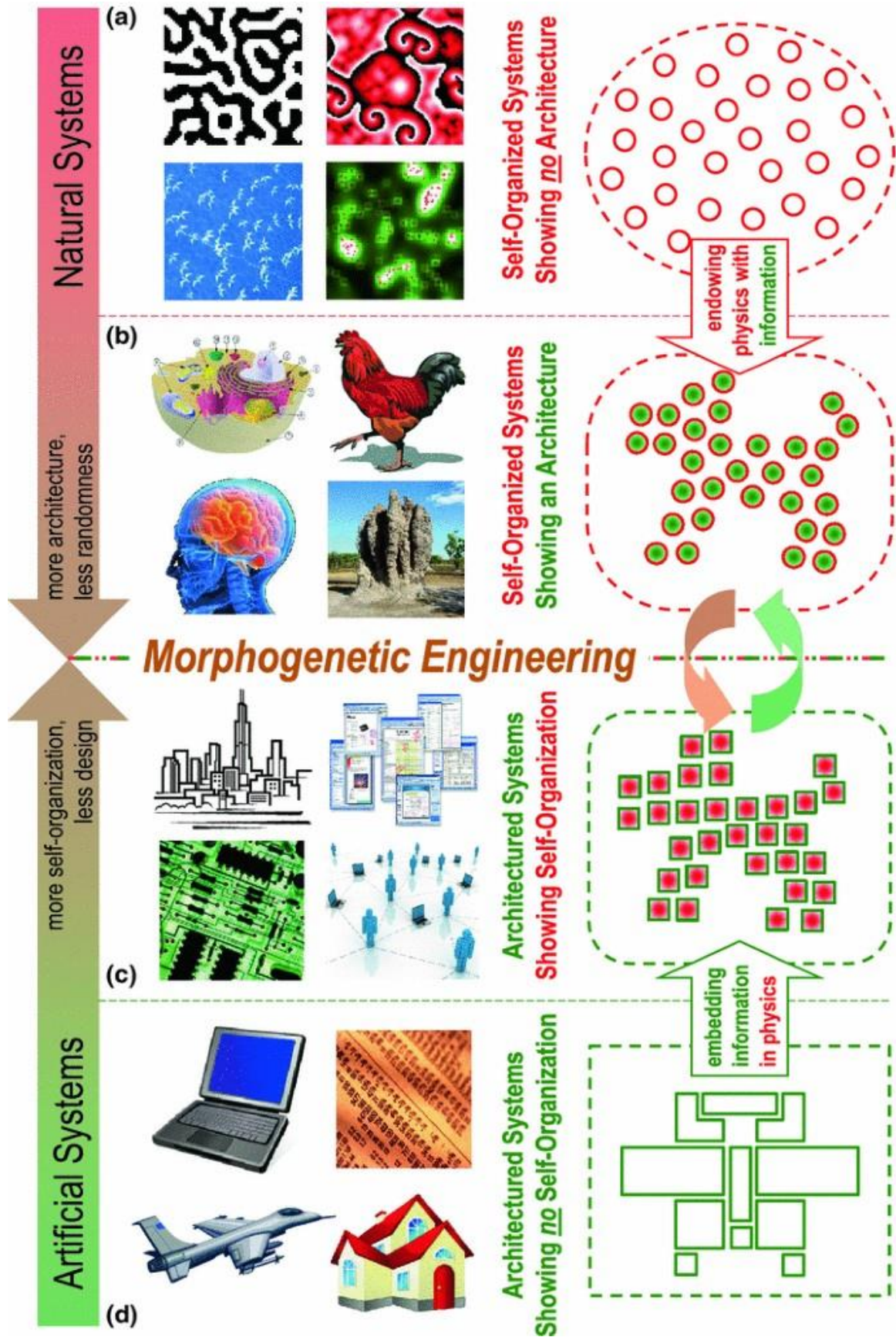


FIGURE 3.1 – « Physicaliser » l'information ou « informer » la physique. Quatre familles de systèmes représentant divers degrés sur les axes auto-organisation conception et architecture aléatoire. (source [Doursat et al., 2012])

Nous présentons ci-dessous les combinaisons possibles des ces deux aspects, entre système compliqués fabriqués par l'humain présentant des caractéristiques du vivants et des systèmes auto-organisés présentant des caractéristiques des systèmes architecturés. [Doursat et al., 2012]

3.2.1 **Systèmes biologiques qui montrent des architectures complexes**

C'est le cas avec certains systèmes biologiques où ils font émerger des structures plus sophistiquées que la formation de simples motifs ou structures. Quelques exemples sont illustrés dans la figure figure3.1b.

Embryogenèse

L'exemple le plus significatif est celui de l'embryogenèse. C'est le processus de formation et l'assemblage autonome d'un organisme pluricellulaire, végétal ou animal [Kauffman et al., 1993], ainsi que la discipline du développement évolutionnaire (« evo-devo ») [Coen, 2000]. Les organismes multicellulaires s'assemblent entièrement par eux-mêmes de manière décentralisée et ceci par la prolifération, la migration et la différenciation cellulaires. Cet assemblage est influencé par les informations génétiques et épigénétiques qui a évolué au cours de millions d'années et s'est intégrée dans chaque cellule.

Colonies d'insectes

Nous observons également des morphologies présentant une architecture dans les colonies d'insectes, où on construit de grandes constructions bien élaborées. Ceci est fait par la collaboration et la communication au sein de de l'essaim sans aucun plan global [Bonabeau et al., 1999]. Cette intelligence collective est naît donc à partir des interactions au niveau individuel en suivant des règles et des lois locales, et ainsi répondre différemment aux stimulus de l'environnement.

Ces phénomènes naturels ont intrigué les chercheurs à savoir comment cela peut se produire sans aucun guide extérieur [Doursat et al., 2012]. Ils se sont demandé comment exporter les propriétés des organismes multicellulaires ou des populations biologiques aux systèmes de l'ingénierie humaine et quel serait le mécanisme à suivre.

3.2.2 Systèmes créés par l'homme, architecturés et montrent aussi une auto-organisation

D'une autre part, les auteurs en [Doursat et al., 2012] ont remarqué que les systèmes de l'ingénierie fabriqués par l'humain présentent aussi quelques propriétés des systèmes complexes naturels. En effet, cela est apparu après l'explosion en taille et en répartition des systèmes technologiques sur une multitude de petites entités [Van Steen and Tanenbaum, 2002]. Ainsi, une auto-organisation s'est émergée de manière imprévue à partir d'une multitude de structures individuelles conçues de manière rigide. Quelques exemples des systèmes architecturés présentant une auto-organisation sont illustrés dans la figure 3.1c.

Le défi ici est d'essayer de regagner une certaine forme de gestion et de direction de ces effets collectifs, mais sans bien sûr rétablir un contrôle central qui pourrait compromettre les bénéfices uniques aux interactions locales. [Doursat et al., 2012]

3.2.3 Vers une auto-organisation programmable

En effet, les auteurs cherchent à combiner ces deux aspects, entre système compliqués fabriqués par l'humain présentant des caractéristiques du vivants et des systèmes auto-organisés présentant des caractéristiques des systèmes architecturés. Il faut donc trouver un moyen pour concevoir des systèmes auto-organisés mais programmables. Ils ont mis le nom de l'ingénierie morphogénétique (IM). Il est défini comme suite :

"L'ingénierie morphogénétique explore la conception, l'exécution et le contrôle (directement, par programmation, et/ou indirectement, par apprentissage ou évolution) des agents de systèmes complexes susceptibles de produire, de façon autonome et reproductible, de grandes architectures hétérogènes, qui peuvent elles-mêmes soutenir un ensemble de fonctionnalités souhaitées, sans s'appuyer sur une planification centralisée ou une direction externe. "[Doursat et al., 2012]

En d'autres termes, vu ces phénomènes qui montrent une auto-organisation programmable, le défi de l'ingénierie morphogénétique est d'exploiter cet énorme potentiel en inventant de nouveaux systèmes complexes programmables ou de nouveaux systèmes d'ingénierie décentralisés. Les chercheurs présumant que cela est possible de deux manières complémentaires :

- **Ajouter aux systèmes physiques de l'information**

L'objectif ici est de modéliser des systèmes complexes artificiels qui montrent de nouvelles capacités morphogénétiques qui n'existent pas préalablement dans la nature.

Le cas des essaims d'insectes ou d'oiseaux hétérogènes caractérisés par des paramètres divers prédéfinis, et ainsi permettre de regrouper ou de rassembler des mouvements de différentes espèces [Sayama, 2009], ce qui donne des formes fluides étonnamment complexes et puissantes. on a tenté ici de modifier les informations génétiques de façon ciblée et étudiée. En fait, il s'agit d'essayer de guider le comportement émergent de la population et de l'interaction entre ses individus afin d'obtenir différents résultats sans précédent.[Doursat et al., 2012]

- **Plonger les systèmes d'information dans la physique**

D'un autre côté, il est également possible d'obtenir des formes de complexité programmables inédites, et ceci dans le cas des systèmes architecturés dont la croissance des technologies ne cesse d'augmenter. En effet, on remarque actuellement, dans différents domaines de l'informatique et de la technologie, que les systèmes se composent de nombreux petits composants. Les chercheurs [Doursat et al., 2012] proposent donc d'en tirer profit de cette croissance de complexité et non de la combattre.

Par conséquent, il est primordial d'adopter cette forme de technologie et d'abandonner petit à petit les systèmes centralisés qui comptent sur l'approche de haut vers le bas. Il faut donc aller vers une approche de bas vers le haut à l'image des systèmes complexes naturels. Les chercheurs qualifient cette nouvelle approche de "métaconception". Cela signifie qu'on étudie les mécanismes au plus bas niveau pour une émergence d'un comportement ou d'un motif global à partir d'interaction entre les composants du système. Ainsi on évite une planification calculée et préprogrammée.

Dans l'ingénierie morphogénétique, il est possible de réaliser un grand nombre de systèmes complexes programmables. Les auteurs citent à titre d'exemple des essaims de robots réels qui peuvent coopérer, s'assembler de manière autonome, ou se construire eux même. On peut aussi imaginer des logiciels auto-programmants dont le code est généré par le logiciel lui même, ou des réseaux d'énergie qui se régulent de manière autonome par la distribution de charge au plus bas niveau sans avoir besoin d'un guide.

Ce qui caractérise ces systèmes est la nature de leurs compositions. Ils représentent une composition d'un très grand nombre d'agents ou d'individus qui vont permettre de créer un système dynamique collectif, et ceci par l'interaction des individus

est l'application des règles locales se trouvant dans l'environnement de chacun des individus.

En résumé, le vrai challenge de cette branche de l'ingénierie morphogénétique est de savoir comment arriver à atteindre les objectifs globaux prédéfinis du système, à son haut niveau, par l'application des objectifs locaux des individus à leurs bas niveaux. En d'autres termes, on doit guider et mener la décentralisation, par la préparation des conditions favorables au niveau local dans l'environnement. Simultanément, il faut laisser les individus agir librement et évoluer sans contraintes dont le but d'acquérir et d'apprendre les capacités nécessaires pour atteindre les objectifs fixés par les ingénieurs tout en présentant des propriétés inédites sans précédent. Il est nécessaire donc, dans l'ingénierie morphogénétique, de faire subir aux systèmes des évolutions artificielles. Et pour obtenir les résultats souhaités, il faut appliquer des critères de sélections souples avec des mécanismes de variation productifs [Doursat et al., 2012].

3.2.4 Regroupement de l'ingénierie morphogénétique à des catégories

Doursat et son équipe [Doursat et al., 2012] ont proposé de regrouper les recherches menés précédemment, et qui semblent faire partie en quelques sortes partie du domaine de l'ingénierie morphogénétique. Les chercheurs ont donc proposé de regrouper ces recherches en quatre grandes catégories selon le type de processus dynamique caractéristique de leurs modèles morphogénétiques. Ces catégories sont présentées comme suit : la première classe est la construction, c'est dans le domaine de la robotique, là où le système se compose d'un nombre réduit d'agents ou de blocs qui peuvent être mobiles ou non. Ces blocs peuvent alors réaliser des tâches robotique de manière autonome, en suite on a la classe de coalescence, il s'agit d'un système qui se compose d'un grand nombre d'agents ou d'individus mobiles qui forment des groupes avec des formes variées (comme agents robotiques, particules logicielles, matière programmable, calcul spatial, calcul amorphe). La troisième classe c'est le développement, dans ce cas, le système a la capacité de se développer à partir d'un seul individu ou groupe initial. Le développement se base sur de simples règles qui s'appliquent au niveau de chaque individu tel que la division ou la fusion. La dernière classe est la génération, le système grandit par transformations successives de ses composants dans l'espace 2D ou 3D en suivant une grammaire de règles de réécriture.

3.2.5 Modèles de développement en IM

Nous citons ici quelques modèles de développement proposés dans ce domaine de l'ingénierie morphogénétique. Nous commençons tout d'abord par le modèle proposé par Doursat et son équipe dans le cadre de ses recherches sur les systèmes

3.2. L'ingénierie morphogénétique : modèle de processus dynamiques pour la morphogenèse

complexes. Le modèle proposé s'appuie sur des niveaux d'expression de gènes dont le but de simuler le processus de développement de formes complexes. [Doursat, 2009b] [Doursat, 2009a]. Son modèle est basé sur un réseau de régulation de gène (GRN) à trois couches. La première couche est au plus bas niveau, qui a comme entrée les informations de positions issues des morphogènes, la deuxième couche centrale contient un certain nombre de gènes qui permettent une segmentation horizontale et verticale de l'embryon. Cette couche contient aussi la description de la régulation génétique. La dernière couche au plus haut niveau, permet d'apporter et mener la production de la protéine régulatrice en fonction de l'expression de gènes activatrices et inhibitrices présents dans la couche centrale.

Le GRN proposé se base sur un modèle de développement qui suit deux règles basiques. La première règle concerne la division cellulaire qui permet à chaque cellule de l'organisme de se diviser avec une certaine probabilité. La deuxième règle concerne l'adhésion intercellulaire permettant la cohérence de l'organisme et qui se base sur des forces élastiques proches d'un modèle masse/ressort.

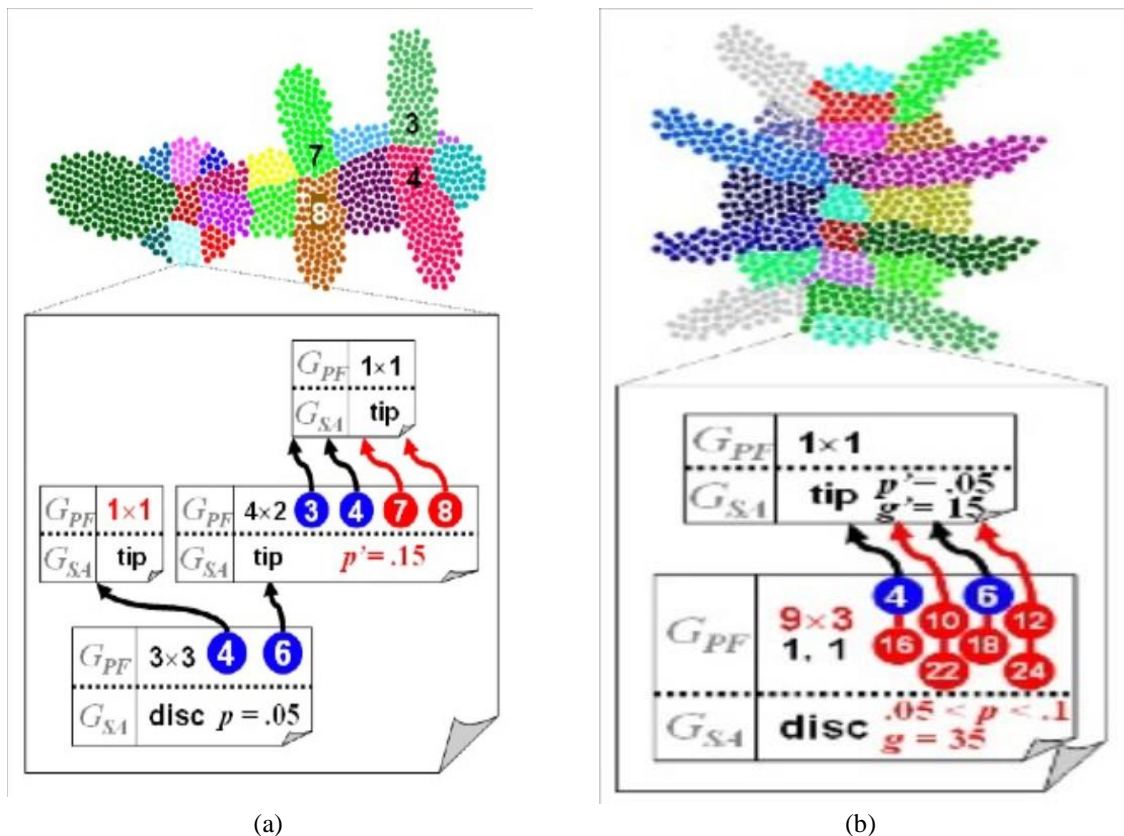


FIGURE 3.2 – Formes développées grâce au modèle de développement de Doursat [Doursat, 2009b]

Donc uniquement avec deux types de morphogènes déterminant le positionnement des cellules dans leurs environnements, les chercheurs arrivent à obtenir différentes formes avec le même nombre de cellules fixé préalablement. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure ci-dessous. On remarque que les organismes produits possèdent un ensemble de régions cellulaires, chacune avec une couleur différente et une spécification unique. Une forme qui se ressemble à un salamandre est illustrée dans la figure 3.2(a) et une autre forme à huit pattes est illustrée dans la figure 3.2 (b). Bien évidemment, ce changement de forme était possible en modifiant certains paramètres, comme le poids ou les fonctions du GRN.

Le deuxième travail est celui de Cussat-blanc, qui a proposé le modèle Cell2organ [Cussat-Blanc et al., 2008]. De la même manière que le travail précédent, l'auteur a conçu un système de développement cellulaire qui permet de faire émerger des organismes et des créatures multicellulaires dans un environnement à deux dimensions. Il faut préciser ici que l'auteur a fixé la morphologie finale que le système doit atteindre et a utilisé une grille torique bidimensionnelle.

Chaque cellule possède un ensemble de capteurs, un système de sélection d'action, une représentation du réseau de régulation génétique et l'expression de gènes activatrices et inhibitrices de la couche centrale. En outre, chaque cellule est capable d'exécuter un certain nombre d'actions, qui sont : la transformation de substrat, l'absorption ou le rejet de substrats, la duplication, la survie et l'apoptose.

Les cellules ont la possibilité de réaliser différentes actions selon ce qui a été défini dans leurs codes génétiques. La duplication est l'une des actions qui permet la spécialisation pour optimiser un groupe d'actions au détriment d'autres.

Le réseau de régulation génétique détermine le coefficient d'efficacité de l'action. Il représente la probabilité de l'exécution de l'action, c'est à dire, si le coefficient est élevé, on aura pas besoin d'une grande énergie pour exécuter l'action et donc il y a une grande chance qu'elle va être exécutée. Par ailleurs, si la valeur de ce coefficient est zéro, l'action ne sera pas exécutée. Il faut cependant assurer que la somme de tous les coefficients doit rester constant tout au long de la simulation. Cela signifie qu'il faut assurer un certain équilibre lors des duplications, en diminuant le coefficient d'une au plusieurs autres actions à chaque fois il y a une augmentation d'un coefficient d'une certaine action. Du coup, dans le modèle Cell2organ, la cellule est spécialisée en modifiant les coefficients d'efficacité durant la duplication. Bien évidemment, toutes les règles de ces variations sont définies par le GRN proposé. Ce dernier est représenté par un réseau dont les nœuds sont les actions avec leurs coefficients d'efficacité, et les arcs sont les quantités du coefficient d'efficacité qui vont être données aux cellules lors des duplications.

Ce système subit une évolution artificielle en utilisant les algorithmes génétiques. Le génotype ici possède trois gènes, qui sont la liste des actions, le système de sélection d'actions et le GRN qui permet la spécialisation des cellules lors des duplications. Les auteurs ont ainsi pu contrôler le développement des créatures et en obtenir différentes formes. Comme illustré dans la figure ci-dessous, les résultats de simulations montrent qu'ils ont pu obtenir des formes variées.

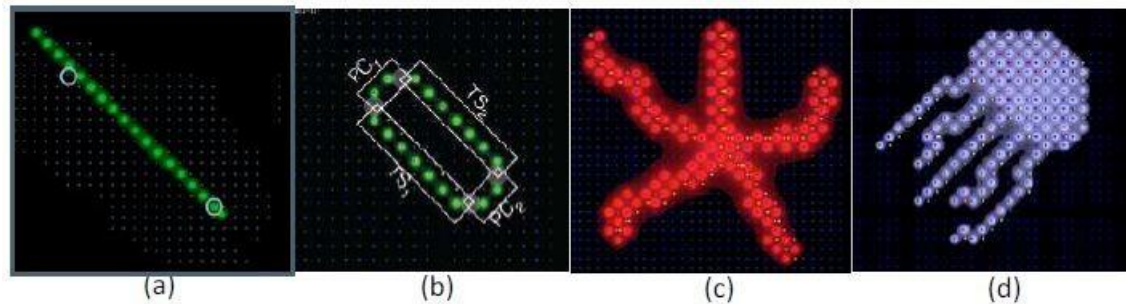


FIGURE 3.3 – Créatures développées. (a) un organe capable de transférer un substrat d'un point à l'autre. (b) Organisme auto-alimenté : coopération de 4 différents organes. (c) une étoile de mer artificielle. (d) méduse artificielle. [Cussat-Blanc et al., 2008]

La robotique évolutive représente également un instrument biologique pour comprendre les propriétés morphogénétiques et par la suite les transitions évolutives des créatures réelles. La robotique évolutive a ainsi été incluse dans le domaine plus large de « l'ingénierie morphogénétique » [Doursat et al., 2012], qui est une évolution de la robotique cellulaire puisqu'elle repose sur une compréhension plus approfondie de la manière dont les organismes et les populations accomplissent de manière fiable des tâches morphogénétiques. Il examine également comment les capacités d'auto-organisation peuvent être traduites en systèmes d'ingénierie et quels principes peuvent réaliser un système morphogénétique. Les principes de base sont toujours les mêmes que la robotique cellulaire : modularité et contrôle décentralisé ; bien qu'il soit doté d'outils et d'approches algorithmiques avancés, tels que ceux offerts par la robotique évolutive. Ces approches explorent simultanément la conception et le contrôle de systèmes autonomes, capables de développer de manière décentralisée des morphologies et des fonctions complexes et hétérogènes.

Les résultats dans ce domaine ont démontré la faisabilité de fabriquer une créature modulaire évoluée [Hiller and Lipson, 2011] et la transférabilité d'un contrôle évolué sur un robot physique non évolutif [Koos et al., 2012], mettant un effort important dans le calcul de la conception du robot et de l'évolution morphologique en simulation. L'approche adoptée par l'évolution la robotique a également été utilisée pour l'évolution des corps mous virtuels [Joachimczak and Wróbel, 2012], en particulier pour l'étude des propriétés des matériaux et de leurs effets sur le comportement des

robots [Bongard et al., 2016] [Bongard et al., 2016]. Tous ces travaux, et bien d'autres, démontrent la faisabilité d'obtenir un robot intellectuellement évolutif et adaptable. Cependant, l'étape de la simulation à la création physique d'un robot de travail de plus en plus autonome, non seulement intellectuellement mais aussi morphologiquement, est toujours en cours. Encore une fois, le principal défi semble résider dans la transduction physique des processus évolutifs pour l'évolution morphologique et la croissance d'un robot réel.

3.3 La vie, un système autopoïétique

Autopoiesis signifie littéralement « autocréation » (du grec : auto – o pour soi- et poiesis – i pour création ou production) et exprime une complémentarité fondamentale entre la structure et la fonction d'un système. À l'origine, l'autopoïèse a été formulée comme une alternative à la théorie de l'écologie darwinienne [Hernes and Bakken, 2003]; elle est désormais considérée comme complémentaire aux modèles existants d'évolution et de changement. Il présente une manière différente de regarder comment les entités interagissent avec leur environnement et comment elles évoluent.

L'autopoïèse est une théorie qui suggère que les systèmes vivants ont la capacité de s'auto-reproduire, de s'auto-entretenir et de se renouveler. Cette capacité nécessite la régulation de sa composition et la conservation de ses limites ; c'est-à-dire le maintien d'une forme particulière malgré l'entrée et la sortie de matériaux. Cette idée a été présentée par les biologistes chiliens Francisco Varela et Humberto Maturana au début des années 1970, comme une tentative de répondre à la question « qu'est-ce que la vie ? », ou « qu'est-ce qui distingue les êtres vivants des éléments non vivants ? La réponse était essentiellement qu'un système vivant se reproduit. Cette capacité d'auto-reproduction est ce qu'ils appellent l'autopoïèse. Ainsi, ils ont défini le système autopoïétique comme un système qui reproduit constamment de nouveaux éléments à travers ses propres éléments. L'autopoïèse implique que différents éléments du système interagissent d'une manière qui produit et reproduit les éléments du système.

Les organismes vivants sont le résultat d'un processus permanent d'autoproduction car les cellules qui les composent se renouvellent en permanence. Ceci est possible grâce à la spécification et à la préservation de l'espace physique défini avec des limites dynamiques. Ces deux propriétés représentent le concept d'auto-configuration. En revanche, les machines qui sont fabriquées par l'homme produisent d'autres choses qu'elle-même, et ils sont produits par d'autres choses qu'elle-même. Ces créatures artificielles ne possèdent pas la capacité pour maintenir elle-même. Rien ne garantit la préservation de ses composants constitutifs. Il semble donc que l'autopoïèse soit une caractéristique essentielle de la vie. Plus encore, les auteurs suggèrent même qu'elle

est "une condition nécessaire et suffisante pour qu'un système soit vivant" [Maturana and Varela, 1980].

La définition qu'en donnent leurs auteurs, les biologistes chiliens Maturana et Varela :

"Il s'agit de concevoir un être vivant comme une organisation auto-poïétique. Cela caractérise le fait qu'un être vivant est un réseau de transformations dynamiques, fabricant ses propres composants (métabolisme) et qui construit une barrière topologique (membrane) qui, à son tour, est la condition nécessaire du fonctionnement en tant qu'unité du réseau de transformations qui l'a engendrée. Ce qui signifie que les êtres vivants sont continuellement entraînés de s'autoproduire."

(H. R. Maturana, F. J. Varela, *Autopoiesis and Cognition*, D. Reidel Publishing Company, 1980, p. 78-79).

Une des caractéristiques de système autopoïétique est qu'il peut maintenir son propre état par la reproduction des composantes qui le constituent afin qu'ils s'adaptent aux perturbations de l'extérieur. Le système a la capacité de décider quel type de réponse donner en fonction du type de changement, et ceci pour tous les composants qui ajustent leur structure afin de maintenir la stabilité du système dans son ensemble.

Olivier Penelaud précise à cette discussion que la théorie de l'autopoïèse sous-tend l'organisation du vivant, est une expression d'un processus auto-producteur, où le but est d'entretenir et de maintenir la cohésion entre la structure formée par l'ensemble des composants physiques d'un organisme ; sa régulation est déterminée par les relations entretenues par ces mêmes composants [Penelaud, 2010]

Le système autopoïétique permet non seulement de maintenir l'organisation interne qui le produit mais aussi les relations de l'organisme avec l'extérieur. Enfin, il faut noter que le système autopoïétique en maintenant l'organisation du système, permet à ce système de le faire exister. Mais elle n'est pas auto-suffisante car les perturbations extérieures commandent son adaptation, mais de façon partielle. [Pelissero, 2017].

Ainsi, la théorie de l'autopoïèse a trouvé sa place dans les explications de l'évolution biologique, les interactions entre les humains et le développement organisationnel. En particulier, quatre domaines ont adapté les concepts d'autopoïèse : l'informatique ([McMullin, 2013] en est un exemple), les systèmes sociaux en général (voir [Jones, 2014], l'économie (par exemple, [Valentinov, 2015]) et les sciences organisationnelles (par exemple [Demetis and Lee, 2016], bien que leur position soit contestée par d'autres, comme [Mingers, 2017]). À l'heure actuelle, il semble qu'il y ait un regain d'intérêt académique pour ce sujet afin de déployer ces principes à une plus grande variété de phénomènes observés dans la nature et les sciences.

Morgan [Morgan, 1998] renvoie à la théorie proposée par Maturana et Varela [Maturana and Varela, 2012] pour expliquer les processus évolutifs : l'autopoïèse, la capacité de s'auto-créeer ou de se renouveler à travers un système fermé de relations, qu'il s'agisse d'organismes vivants ou éventuellement d'organisations et de la société. De ce point de vue, les systèmes vivants s'engagent dans des modèles d'interaction circulaires par lesquels le changement dans un élément du système est couplé à des changements ailleurs, mettant en place des modèles d'interaction continus qui sont toujours autoréférentiels.

Ainsi, un système n'entre que dans les interactions spécifiées par sa structure externe ; cette structure est directement liée à sa structure interne. Cela signifie que l'interaction d'un système avec son environnement est un reflet et une partie de sa propre structure. Cela implique également qu'un système (vivant) interagit avec son environnement d'une manière qui facilite sa propre autoproduction ; de cette façon, l'environnement devient vraiment une partie de lui-même.

Ces implications du concept d'autopoïèse signifient qu'il a besoin d'une explication supplémentaire. L'exemple le plus utilisé de système autopoïétique est la cellule biologique (d'ailleurs l'une des entités qui a motivé ces scientifiques chiliens à définir l'autopoïèse). Par exemple, la cellule eucaryote est constituée de divers composants biochimiques, tels que des acides nucléiques et des protéines, et est organisée en structures délimitées, telles que le noyau cellulaire, divers organites, une membrane cellulaire et un cytosquelette.

Ces structures de ressources, basées sur un flux externe de molécules et d'énergie (les éléments qui coulent), produisent d'autres éléments qui, à leur tour, continuent à maintenir la structure limitée qui donne naissance à ces éléments. Des exemples de ces éléments sont les chromosomes et les membranes cellulaires qui sont créés pendant et après une division d'une seule cellule.

3.3.1 Exemples

La cellule

En biologie, la cellule représente l'exemple le plus petit d'un système autopoïétique. La cellule reproduit ses propres éléments structurels et fonctionnels, comme les protéines, les acides nucléiques ou les lipides. En effet, ces éléments sont fabriqués par la cellule elle-même et ne sont pas seulement importés de l'extérieur.

Par ailleurs, les cellules ont la capacité de s'auto-répliquer, puisqu'elles proviennent constamment et continuellement d'autres cellules préexistantes. On voit ceci dans les organismes unicellulaire, tels que les bactéries, les spores fongiques et les levures.

Ainsi, la cellule, qui est l'unité fondamentale de la vie, représente le plus petit système autopoïétique.

Organismes multicellulaires

On observe dans la nature un autre exemple de systèmes autopoïétiques. Il s'agit des organismes multicellulaires, qui se composent de nombreuses cellules. Cependant, ces organismes demeurent des systèmes plus complexes comparés aux organismes unicellulaires, mais tout en gardant toujours les mêmes caractéristiques fondamentales.

Ces organismes complexes, tels que les animaux ou les plantes, ont donc également cette capacité de s'auto-reproduire et de s'auto-entretenir grâce à l'échange d'éléments et d'énergies avec l'environnement extérieur. En revanche, ce sont des systèmes autonomes, séparés de leurs environnements extérieurs par des membranes comme la peau chez les animaux. Ainsi, ils maintiennent l'homéostasie et l'autorégulation du système. Dans ce cas, le système est l'organisme lui-même.

Les écosystèmes

Les écosystèmes sont également des exemples des systèmes autopoïétiques à des niveaux de complexité plus élevés. Certains des écosystèmes qui répondent aux caractéristiques de base des systèmes autopoïétiques, nous citons les récifs coralliens, les prairies et les étangs.

Gaïa

Gaïa est la personnification de la Terre en mythologie grecque. Dans son livre "La Terre est un être vivant : L'hypothèse Gaïa" [Lovelock and Couturiau, 1986], le scientifique anglais atmosphérique James E. Lovelock, nous dit que la Terre " Gaïa " est une organisation supérieure, capable d'auto-régulation.

Gaïa regroupe ainsi tout les êtres vivants sur Terre pour former un superorganisme avec des caractéristiques similaires à celles des organismes cellulaires. Par exemple, la régulation des réactions chimiques dans l'atmosphère, la température moyenne mondiale et la salinité des océans sur des périodes de plusieurs millions d'années. En fait, ce type de régulation ressemble à la régulation homéostatique présentée par les cellules. Par conséquent, la Terre peut être considérée comme un système basé sur l'autopoïèse, où l'organisation de la vie fait partie d'un système thermodynamique ouvert, complexe et cyclique. [Dempster, 2000] [Varela et al., 1974] [Mingers, 1994] [Mingers, 1989] [Luisi, 2003] [Varela et al., 1974] [Luhmann, 2020]

3.3.2 **Modèle informatique de l'autopoïèse**

La meilleure compréhension des concepts précédemment définis peut être obtenue en envisageant les résultats de la simulation informatique liés à la modélisation de l'organisation autopoïétique la plus simple des processus de production. Considérons la figure 3.4, qui résume les éléments constitutifs essentiels de | le modèle dit APLAUTOPOIESIS. Les trois processus - production (P), liaison (B) et désintégration (D) - sont postulés comme étant réalisables en raison des propriétés spécifiques des composants se déplaçant de manière aléatoire sur une grille de pavage à deux dimensions. Ces processus, à leur tour, déterminent les interactions qui ont lieu dans l'espace des composants.

Les processus peuvent être organisés de plusieurs manières, agissant indépendamment, en série, etc. Considérons, par exemple, la production agissant seule : tout substrat serait simplement transformé en maillons et le processus de production cesserait. Ou, on peut concaténer production et collage : tout le substrat se transforme en maillons ; les liens se lient ensuite en formant une ou plusieurs structures à croissance linéaire, un cristal. L'organisation sous-jacente est ouverte, le système allopoïétique.

Par exemple, considérons l'environnement des maillons et concaténonons les processus de liaison et de désintégration : tous les maillons sont finalement transformés dans l'environnement du substrat, avec quelques chaînes liées intermittentes émergeant et disparaissant dans le processus. Dans aucun de ces cas, les produits terminaux n'étaient nécessaires pour alimenter les processus eux-mêmes – il n'y avait pas de fermeture organisationnelle.

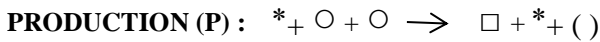
Considérons la fermeture organisationnelle la plus simple : la production et la désintégration. Chaque processus, pour se maintenir, dépend des produits de l'autre processus. Les processus sont interdépendants et enchaînés de manière circulaire. Selon les taux relatifs des deux processus, le résultat serait un mélange de substrat et de liens oscillant autour d'une certaine proportion d'équilibre.

Les trois processus, enchaînés de façon circulaire, sont nécessaires à l'autopoïèse. Dans la figure 3.4, une telle organisation fermée est implicite. Laissant de côté la notion d'origine et examinant un système en cours, observez que la désintégration « produit » le substrat nécessaire à la production, la production « produit » le catalyseur nécessaire à elle-même et les liens nécessaires au collage, et le collage « produit » la matière nécessaire à la désintégration .

Composants

- * Catalyseur (s), représenté par un catalyseur
- () Des trous, représenté par un espace vide
- Substrat, représenté par un petit cercle
- Lien gratuit, représenté par un carré vide
- Lien unicolle, représenté par un carré avec un quota à l'intérieur et une seule cendre
- Lien entièrement collé, représenté par un carré avec un signe de division APL à l'intérieur et deux tirets

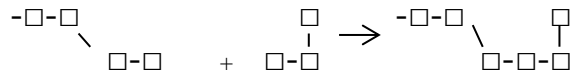
Organisation des composants



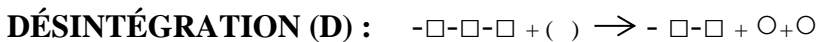
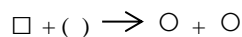
Un catalyseur et deux unités de substrat produisent un lien libre et un trou comme sous-produit. Le catalyseur n'est pas affecté et ne change pas de position. Cette stpulation peut être assouplie. La production ne peut avoir lieu que lorsque les deux unités de substrat se trouvent dans un voisinage prédéterminé du catalyseur.



Deux maillons libres peuvent être liés ensemble pour démarrer une chaîne ; un maillon libre peut être collé avec un canal existant de maillons collés, ce qui allonge la chaîne.



Deux chaînes existantes de liens collés peuvent être dans une chaîne plus longue



Tout lien, libre ou délimité, peut se désintégrer en deux unités de substrat à condition qu'il y ait un trou (espace) disponible dans le voisinage immédiat de ce lien afin que l'unité de substrat supplémentaire puisse occuper l'espace

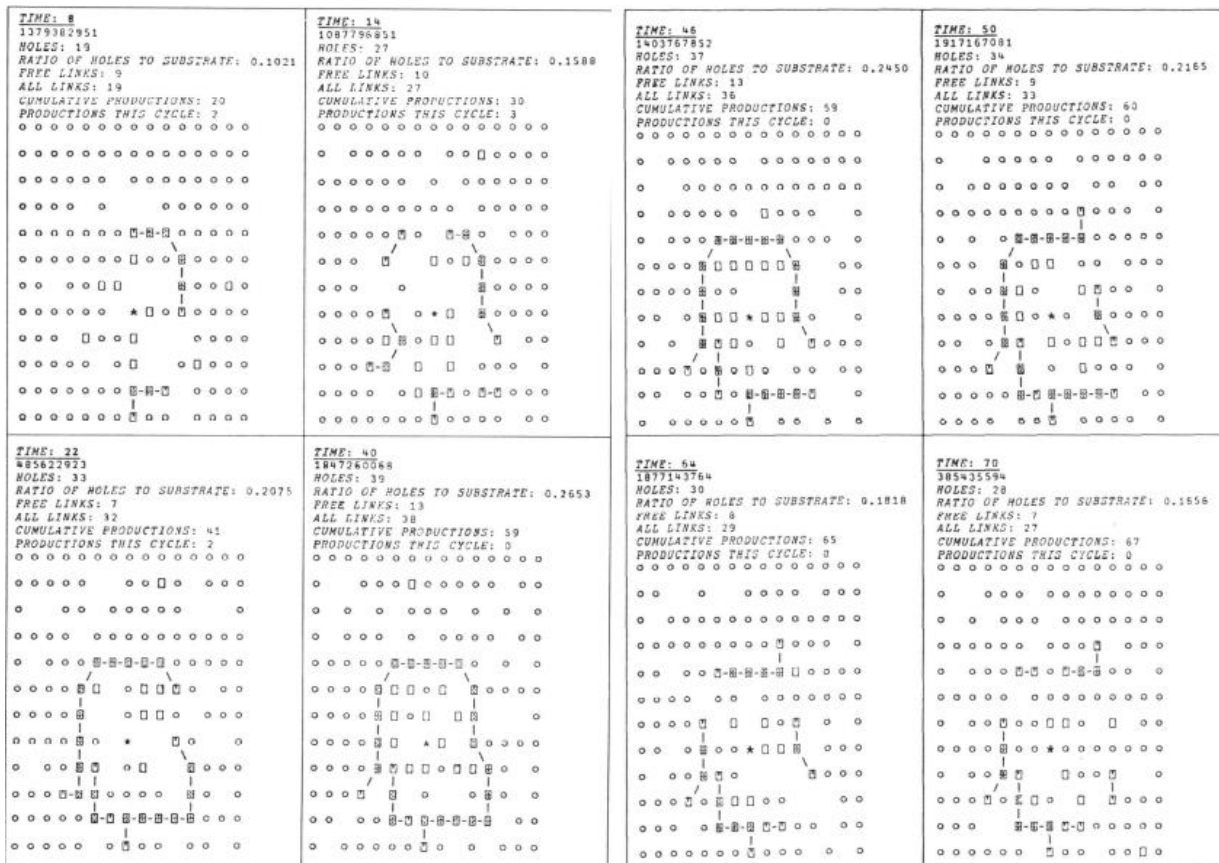


FIGURE 3.5 – des « instantanés » d’une histoire particulière d’une organisation autopoïétique équilibrée.

Pourtant, l’organisation circulaire des processus n’est toujours pas suffisante. Les cadences de « production » doivent être en harmonie. Un taux de désintégration trop « vigoureux » ne permettrait jamais aux chaînes liées de former une frontière topologique viable : un taux de désintégration trop faible conduirait à une « cristallisation », et ainsi de suite. Dans la figure 3.5, il est présenté des « instantanés » d’une histoire particulière d’une organisation autopoïétique équilibrée.

La frontière topologique émerge à environ TEMPS 40 (quatrième trame), et elle permet à l’unité de maintenir son autopoïèse indéfiniment. Dans cette course particulière, nous permettons aux taux de se déséquilibrer et l’unité perd progressivement son autopoïèse et finit par disparaître.

Une série d’expériences intéressantes peut être réalisée avec le programme APL-AUTOPO IESIS. Dans la figure 3.6, observez comment la même organisation autopoïétique se manifeste dans une structure différente, en réponse à une perturbation environnementale simulée. Dans la figure 3.4, observez que la même organisation (aucune complexité supplémentaire introduite dans les règles d’interaction n’est

nécessaire) est capable de s'auto-reproduire si un composant (deuxième catalyseur) est « placé » dans l'enceinte d'origine.

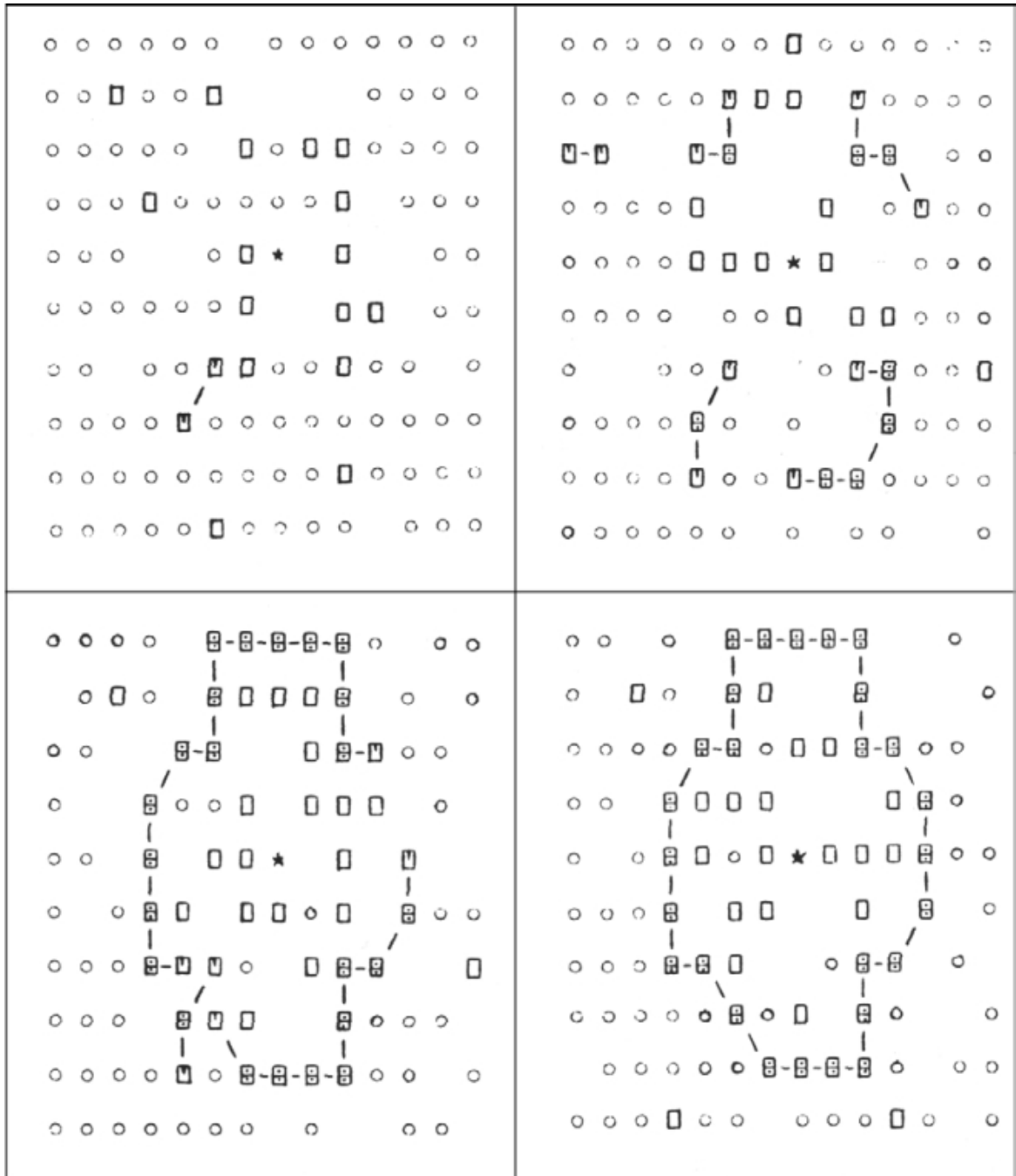


FIGURE 3.6 – des « instantanés » d'une histoire particulière d'une organisation autopoïétique équilibrée.

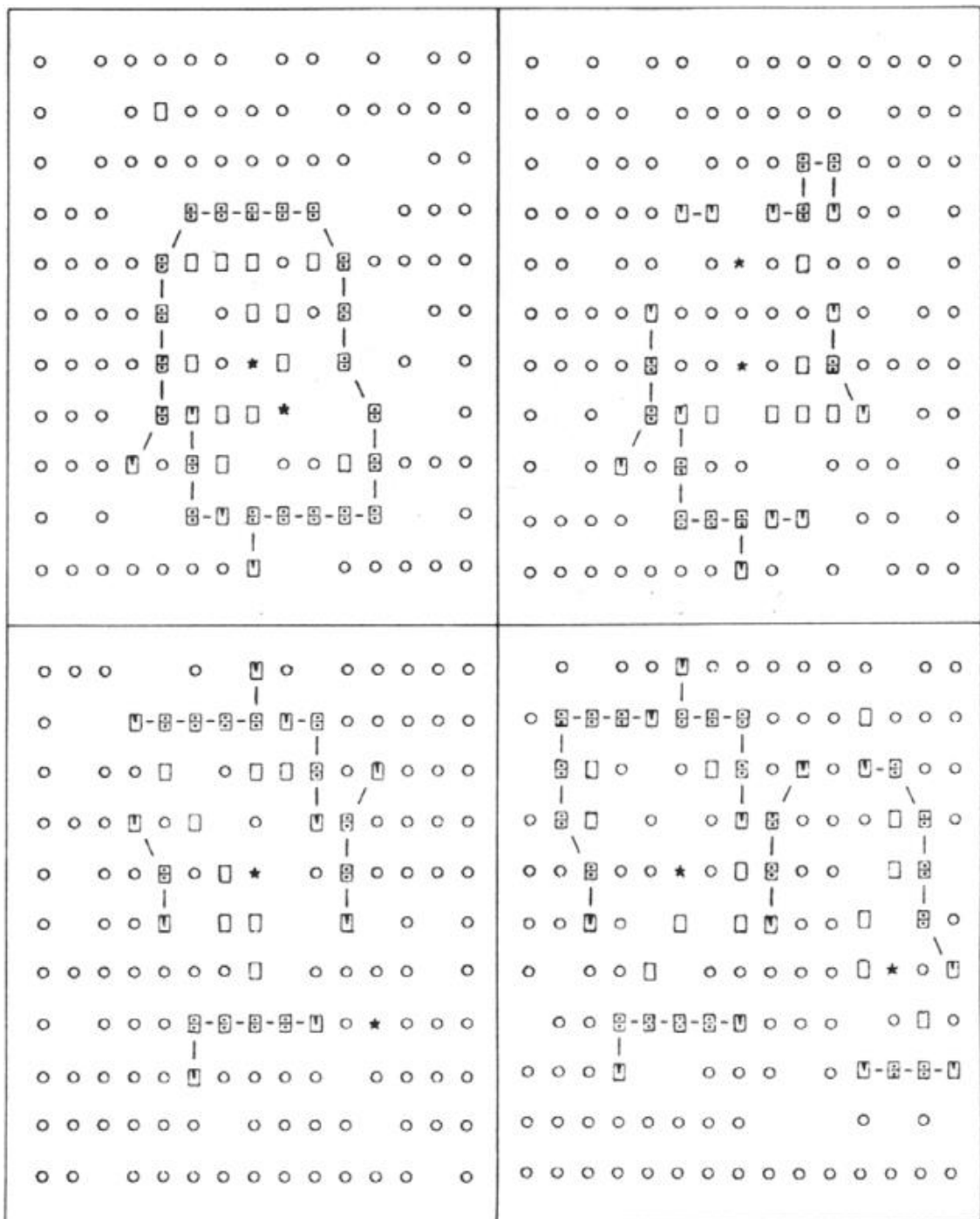


FIGURE 3.7 – Les éléments constitutifs essentiels du modèle dit APLAUTOPOIESIS

Les ontogénies résultent de l'interaction entre les configurations d'un individu et son environnement. Dans [Agmon et al., 2016] les auteurs ont proposé de cartographier l'espace de toutes les ontogénies possibles pour une protocellule modèle dans un environnement spécifique en l'exposant à des perturbations séquentielles et en mesurant ses réponses. Le réseau ontogénique résultant contenait une structure riche découverte par une combinaison de méthodes statistiques et de la théorie des graphes. L'ensemble des morphologies de configuration s'est avéré se regrouper en fonction de la similarité morphologique (figure 3.8), et ces clusters correspondaient à peu près à ceux identifiés dans la topologie du réseau.

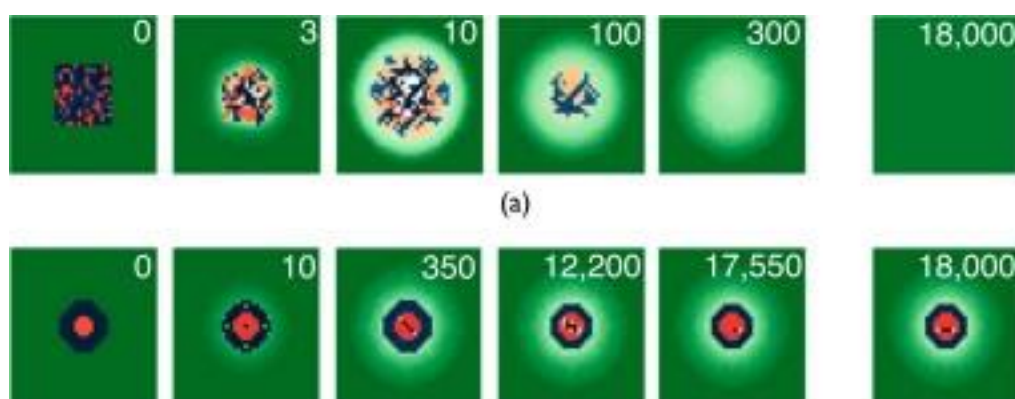


FIGURE 3.8 – morphologies obtenues par le réseau ontogénique proposé par [Agmon et al., 2016]

Dans des travaux de [Turney, 2020], les chercheurs introduisent Model-S, un modèle informatique de l'évolution de la symbiose. Dans Model-S, les modèles de graines se disputent la survie dans des compétitions individuelles dans le jeu de l'immigration (IG), inventé par Don Woods en 1971 ¹².

The Immigration Game est une variante à deux joueurs du solitaire Game of Life (GoL), inventé par John Conway en 1970 [Gardner, 1970a] [Gardner, 1970a]. Le gagnant de l'IG est le modèle de graine qui pousse le plus. Model-S ajoute un algorithme évolutif externe à IG. L'algorithme fait évoluer une population de modèles de graines, en sélectionnant les graines en fonction de leur capacité à gagner IG. Model-S est construit avec quatre couches, chaque couche suivante s'appuyant sur les couches précédentes. Le but d'avoir quatre couches est de mesurer la contribution de chaque couche supplémentaire à la fitness de la population. Cela donne un aperçu des forces et des faiblesses de chaque couche. Les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous.

1. <https://conwaylife.com/wiki> (consulté le 12/07/2022)

2. https://conwaylife.com/wiki/Lifeline_volume2 (consulté le 12/07/2022)

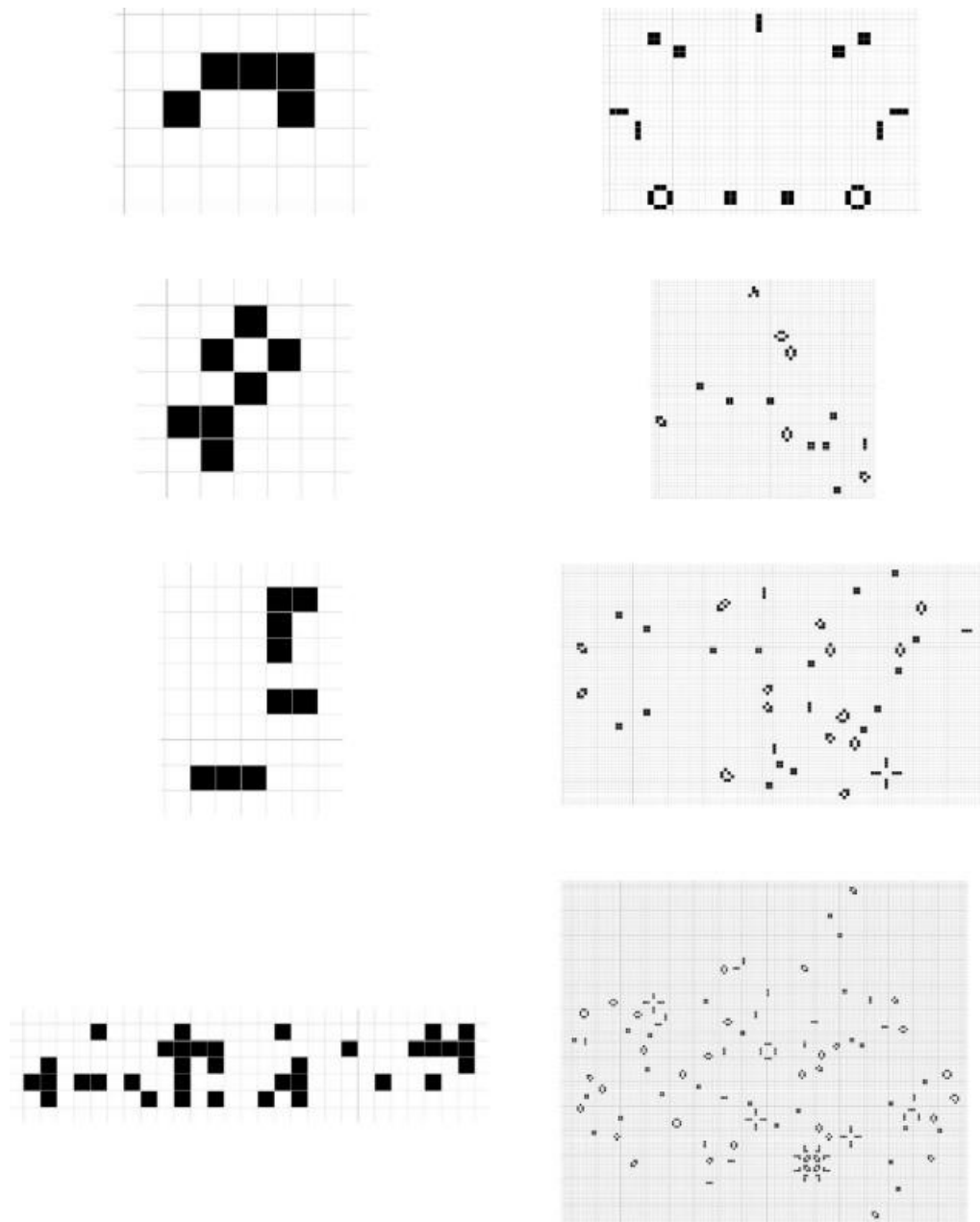


FIGURE 3.9 – Les créatures obtenues par Model-S [Turney, 2020]

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le domaine de l'ingénierie morphogénétique et le concept de l'autopoèse. Dans le prochain chapitre nous allons voir comment nous nous inspiré de ces deux concepts dans la réalisation et la conception de notre propre modèle de développement cellulaire.

Systeme autopoietique à plusieurs niveaux

4.1 Introduction

La compréhension des systèmes biologiques et la reconception de leur capacité à générer des systèmes complexes constituent le premier objectif de recherche dans le domaine de la vie artificielle. En effet, la théorie autopoïétique est très intéressante que se soit en biologie dans les systèmes naturels ou dans d'autres disciplines.

Nous avons voulu étudier cette théorie et voir comment elle pourrait influencer les systèmes d'auto-organisation dans la vie artificielle. A la base, cette théorie a été proposée pour définir l'organisation du système vivant et ses différentes caractéristiques. Sur la base de cette théorie, nous avons proposé un réseau d'auto-crédation et d'organisation avec des niveaux hiérarchiques pour développer une forme structurée d'organes sans contrôle externe ou central.

4.2 Organisation multi-niveaux

En raison de la complexité de l'embryogenèse, il serait difficile pour une cellule de pouvoir créer tout l'organisme et réaliser l'ensemble du processus du développement. Au cours de l'embryogenèse, certaines cellules ne remplissent qu'une seule fonction : construire un tissu spécifique, plutôt que l'ensemble de la créature.

La structure corporelle d'un organisme multicellulaire possède différents niveaux d'organisation, les cellules étant considérées comme les unités fondamentales de la vie (par exemple, les tissus sont des groupes de cellules similaires qui travaillent ensemble pour accomplir une tâche spécifique, et les organes sont constitués de deux ou plusieurs tissus qui sont organisés pour exercer une fonction précise...).

Par conséquent, nous avons proposé de concevoir un modèle de développement hiérarchique à trois niveaux ; au niveau d'organe, au niveau de tissu et au niveau

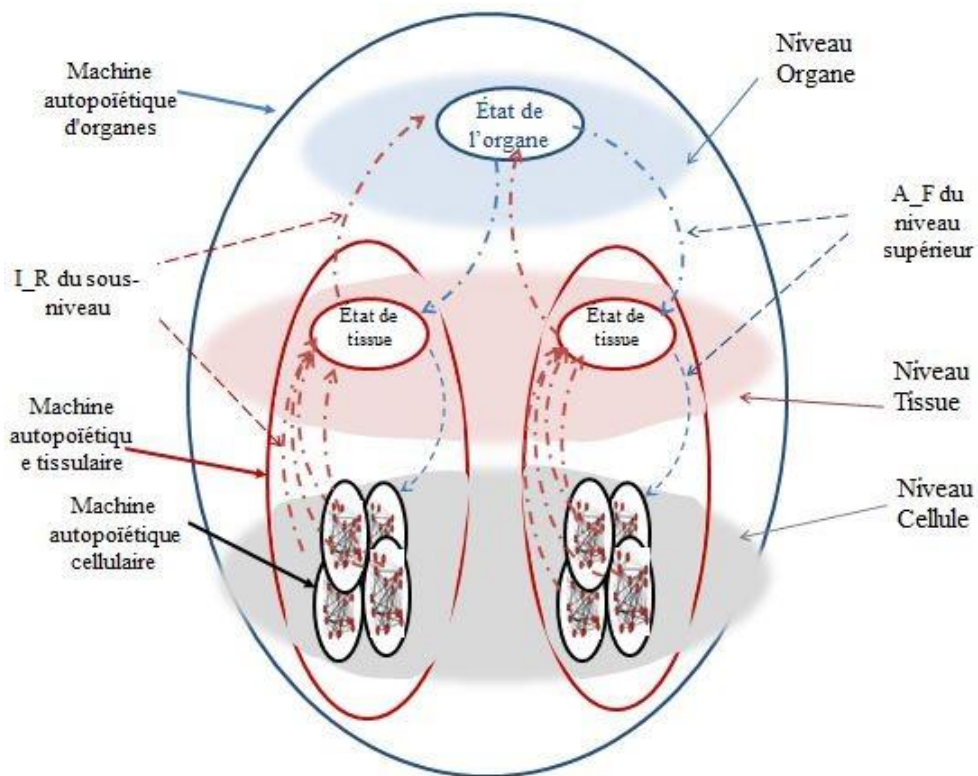


FIGURE 4.1 – Le réseau cyclique de création des différents systèmes autopoïétiques (cellule, tissu et organe) et les différentes interactions entre eux.

de la cellule. L'objectif de ce modèle est de créer et réguler les différents individus, à savoir l'organe artificiel, le tissu artificiel et la cellule artificielle). La figure 4.1 illustre comment ces trois niveaux sont organisés.

Le concept de niveaux est une métaphore. En fait, se sont un ensemble de paramètres calculés et régénérés via les composants du réseau dont le but de produire les nombreuses machines autopoïétiques du système. Les paramètres en question sont cités ci-dessous :

Les paramètres cités ci-dessus vont permettre la régénération du réseau de création des individus. Nous élaborons ce point plus en détail dans la prochaine section.

- L'état de l'individu (état de l'organe, état du tissu, état de la cellule) représente les valeurs qui décrivent le niveau de construction de l'individu.
- Le rapport individuel « IR » : représente une valeur flottante comprise entre 0 et 1 qui est calculée et diffusée par les individus des sous-niveaux.
- Le Facteur autopoïétique « AF » : représente une valeur flottante comprise entre 0 et 1 et elle est dérivée des niveaux supérieurs.
- Des Signaux diffusés par les voisins du même niveau. Cela permet aux individus d'avoir des informations sur leurs voisins.

Les paramètres initiaux du système sont représentés par une table de seuils, une cellule souche et l'état de l'organe. Ce n'est qu'avec ces trois paramètres que le système MLAS pourrait se créer et se réguler en tant que système autopoïétique (auto-crétion et auto-architecture sans aucune information extérieure), et cela dans le but de développer un processus d'embryogenèse artificielle.

4.2.1 Table des seuils

Il y a un degré de construction requis pour chaque individu dans notre processus d'auto-crétion d'individus. Ce degré est représenté dans la table des seuils. Il contient le seuil de construction pour chaque individu à chaque niveau. Veuillez voir la figure 4.2(b). Le seuil pour chaque individu est une valeur flottante comprise entre 0 et 1.

4.2.2 État de l'organe

Comme montré dans la Figure 4.2(a1), l'état de l'organe est Structuré comme suit :

- Identifiant d'état (Org_Id) codé sous forme d'entier compris entre 1 et P.
- Les rapports individuels (I_Rorg) sont codés comme des flottants compris entre 0 et 1. La valeur de ces rapports individuels détermine le taux de réussite des composants qui construisent l'organe. Au départ, le facteur I_Rorg est initialisé à 0.
- Le facteur autopoïétique (A_Forg) est codé comme un flottant compris entre 0 et 1, initialisé à 1. A_Forg est utilisé pour vérifier si la machine autopoïétique de l'organe doit créer ou non de nouveaux composants.

Si les valeurs des deux concentrations sont comme suit ; $I_Rorg = 0$ et $A_Forg = 1$, cela signifie que l'organe n'existe pas encore.

4.2.3 Cellule souche

En plus de la table des seuils et de l'état de l'organe, une cellule souche inactive est présente dans le système avec un GRN artificiel booléen irrégulier ainsi qu'une table d'intérêts (Figure 4.2(a2)).

La table d'intérêts représente tous les intérêts globaux possibles de la cellule. Les intérêts globaux sont décrits dans la section (GRN Booléen artificiel). De nombreuses expérimentations citées dans la littérature suggèrent que l'organe grandit pour atteindre sa masse finale prédéterminée, ce qui signifie qu'il possède des informations intrinsèques sur sa taille finale [Conlon and Raff, 1999] [Day and Lawrence, 2000]

[Klingenberg, 2002]. En revanche, les techniques pour fixer les limites de la croissance ne sont pas bien caractérisées [Li et al., 2008].

Le mécanisme de fixation des limites de croissances pour chaque tissu est donc précisé dans la table d'intérêts. Dans chaque case de la table d'intérêts, nous présentons l'organe par son identifiant "ID_Org" et un groupe de tissus qui construisent cet organe. Chaque tissu est représenté par :

- Identifiant "ID", représenté par un entier compris entre 1 et N.
- Source de la cellule, la première cellule qui permet le commencement de la construction de ce tissu.
- La taille maximale représente la longueur et la largeur maximales du tissu. Elle est représentée par un nombre entier compris entre 0 et m pour la longueur, et 0 et n pour la largeur. Elle est considérée comme la technique de fixation de la limite de croissance du tissu. Étant donné que l'organe est un groupe de tissus, la taille maximale de ses tissus fixe également les limites de l'organe. Cependant, la taille finale de l'organe et de chaque tissu à la fin du processus de développement dépend des signaux de l'environnement et de la Table des seuils du système.

4.3 Le but du MLAS et ses différents individus autopoïétiques

Nous avons mentionné précédemment que le passage de l'auto-organisation à un système d'auto-organisation préprogrammé (système d'auto-architecture) est considéré comme un défi dans l'EM et la vie artificielle. Afin de contribuer à résoudre ce problème nous avons proposé (MLAS). Il représente un réseau dont l'objectif est de créer un système qui a la capacité d'auto-crédation et auto-architecture sans guide externe ni planification. Le réseau MLAS adapte ses différents individus et composants autopoïétiques pour développer la bonne architecture.

Selon l'état de l'organe et selon la cellule souche, le réseau MLAS va s'organiser et se créer pour atteindre le niveau de construction requis (table des seuils) tel une machine autopoïétique à l'intérieur d'une machine autopoïétique à trois niveaux.

Ce réseau de création et de régulation des individus (MLAS) est créé par l'interaction entre les différents niveaux. Partant du nœud de l'état de l'organe présent dans le niveau le plus élevé jusqu'au réseau de cellules souches (GRN Booléen artificiel).

A chaque cycle de ce réseau, différents changements peuvent se produire (nombre de nœuds, organisation des individus, état de l'individu). Par ailleurs, de nouveaux nœuds peuvent apparaître et de nouvelles transformations entre individus peuvent

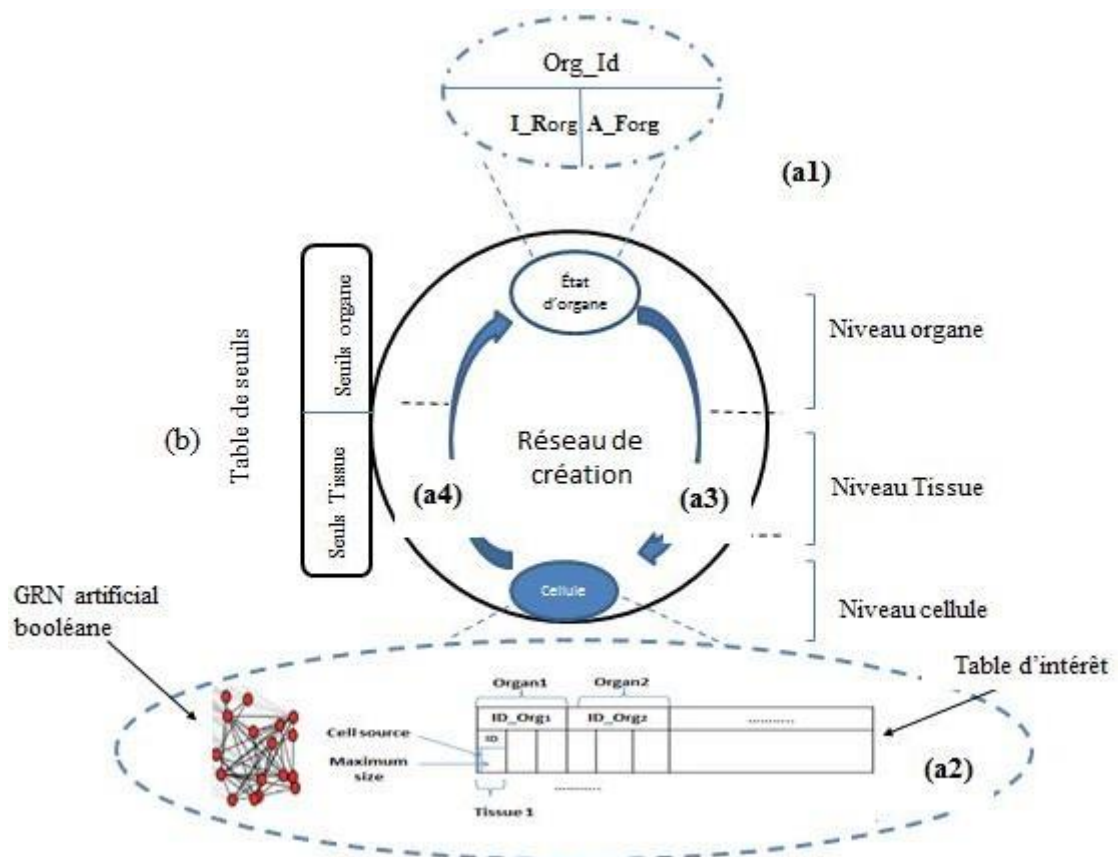


FIGURE 4.2 – L’initialisation du MLAS dans les différents niveaux. (a1) la structure du nœud de l’état de l’organe; (a2) le GRN artificiel booléen et la table des intérêts présente à l’intérieur de la cellule souche; (a3) le premier demi-cercle entre le nœud de l’état de l’organe et la cellule souche; (a4) le deuxième demi-cercle entre la cellule souche et le nœud de l’état de l’organe; (b) la table de seuil qui représente le niveau de construction requis pour chaque individu.

4.3. Le but du MLAS et ses différents individus autopoïétiques

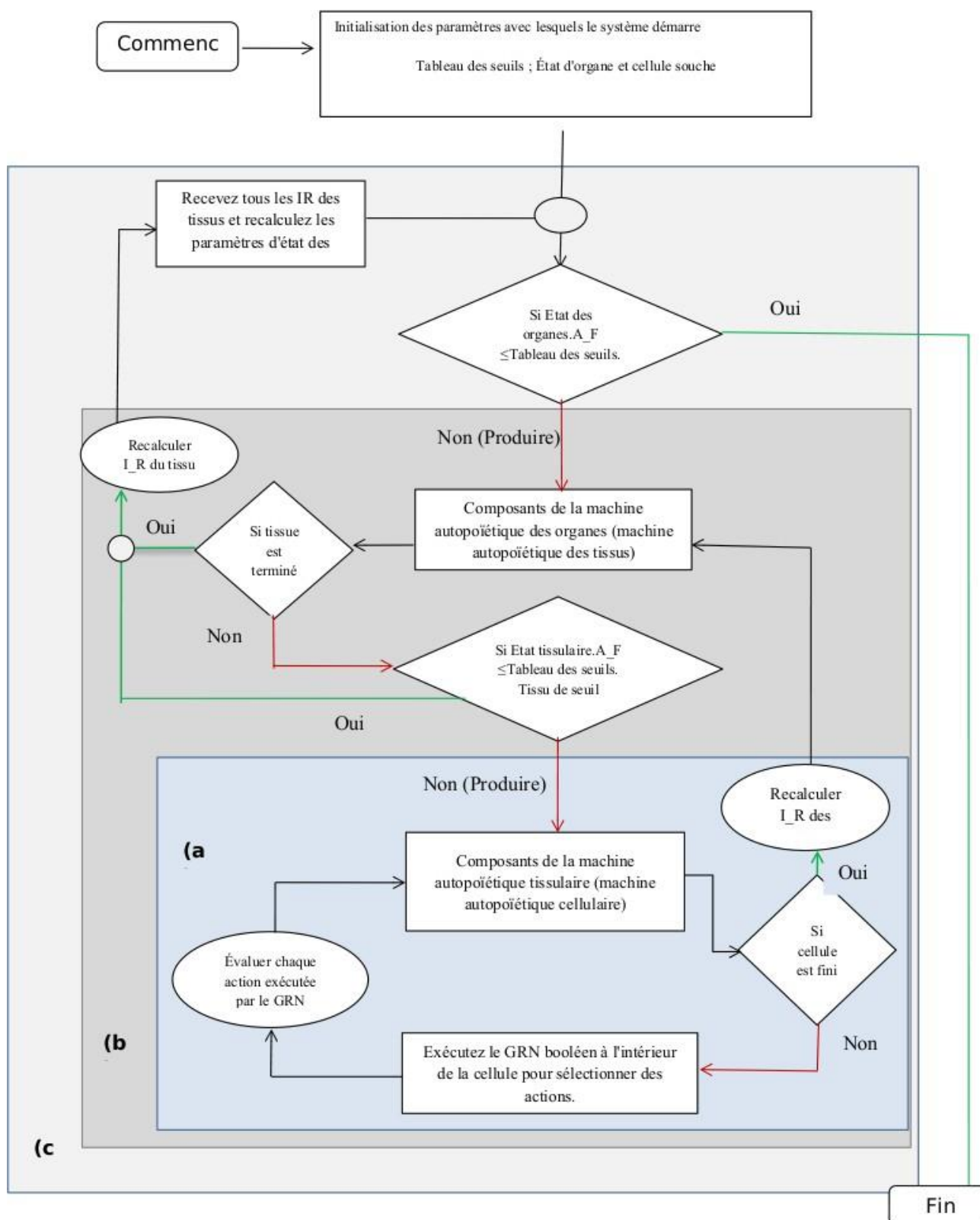


FIGURE 4.3 – Organigramme qui décrit le processus d'exécution de l'algorithme de MLAS dans les différents niveaux des individus; (a) machine autopoïétique de la cellule, (b) machine autopoïétique du tissu, (c) machine autopoïétique d'organe.

être générées par le réseau, et cela dans le but d'atteindre le degré de construction requis dans la table des seuils.

MLAS amène les individus à se créer et à combiner entre auto-organisation et architecture. Selon les différents niveaux du système, les individus se diffèrent d'un niveau à un autre (Individus Cellulaires, Individus Tissus, Individus Organes). Au tout début, il y a un individu à l'intérieur du système (cellule souche unique) au niveau cellulaire. Les cellules sont l'unité de construction de base de tous les autres individus. L'individu tissu se compose de plusieurs cellules avec des structures et des fonctions similaires. Un organe est constitué de groupes de tissus qui fonctionnent ensemble pour accomplir la composition d'un organe entier selon le niveau de construction requis dans la table des seuils.

En d'autres termes, chaque individu du système est une machine autopoïétique dans son processus de création et de régulation. Il se crée et se régule comme une organisation fermée (sans aucune information ni guide de l'extérieur de la machine autopoïétique) via un réseau de production de composants, qui produit les composants de l'individu. Ces composants peuvent interagir entre eux et régénérer le réseau de production, ce qui conduit à nouveau à créer ces composants. Ce réseau cyclique de création montre la capacité de l'individu à s'organiser et à se créer sans aucune pulsion extérieure de l'environnement.

Comme illustré dans la figure numéro 4.1, la première machine autopoïétique, qui est celle de l'organe, commence au niveau supérieur du système « niveau d'organe » avec le premier nœud « État d'organe ». Les composants de cet individu (les tissus) sont présents dans le sous-niveau. Par ailleurs, les composants de l'organe (tissus) sont à leurs tours des machines autopoïétiques à part entière, possédant chacun son propre réseau de production et composants. Les composants de la machine autopoïétique "tissu" sont des cellules, qui à leurs tours sont des machines autopoïétiques. Le réseau de création au niveau des cellules est le GRN Artificiel Booléen. Ses composants sont les actions exécutées par ce GRN Artificiel Booléen. Ces actions se régènèrent et régulent le Booléen Artificiel GRN. Cela signifie que la cellule crée et régule son chemin d'actions et son histoire.

4.4 Identités des individus

Chaque Individu du système possède un vecteur d'identité passant de l'organe à la cellule. Les individus (cellule, tissu, organe) sont représentés par leurs états (État des organes, état des tissus et état des cellules) et par leurs composants (tissus, cellules et actions).

Respectivement, l'état d'un individu contient son identité et ses deux rapports (I_R, A_F). Le but de chaque individu est de maximiser sa concentration I_R. La

longueur du vecteur identité dépend du niveau de l'individu, ce qui distingue son identité.

L'identité des individus est représentés comme suit : (voire figure 4.4)

- Individu organe : Organ ID= Org_Id, codé comme un entier compris entre 1 et P.
- Individus tissu : Tissue ID= Org_Id, T_Id, « T_Id » qui est codé comme étant un entier compris entre 1 et N.
- Individus cellule : Cell ID= Org_Id, Id_T, Id_C, Id_C représente le numéro de la cellule dans le système. Il est codé comme entier compris entre 1 et k.

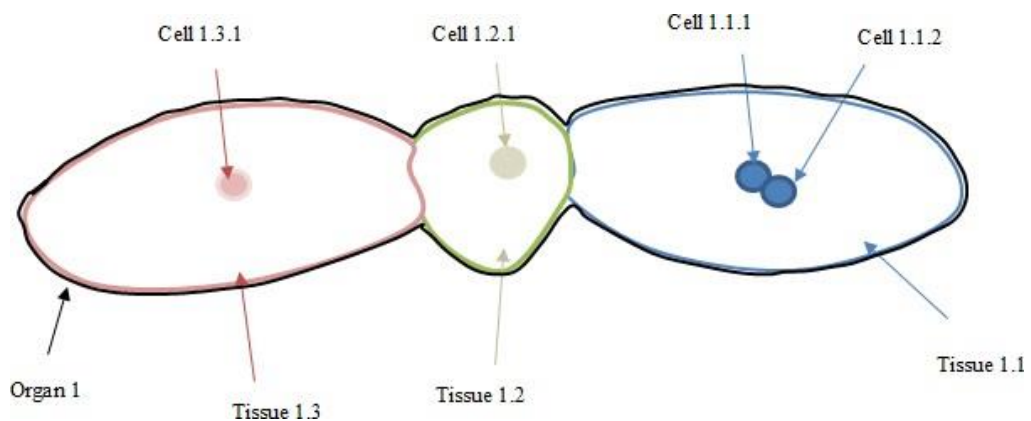


FIGURE 4.4 – Les différentes identités des individus.

Par ailleurs, cette identité permet de distinguer la fonction que l'individu doit accomplir. Dans le cas de l'individu cellule, l'identité comprend les identifiants de l'organe et du tissu pour lequel la cellule travaille. Par exemple considérons que l'identifiant du $cell_xID = 1, 3, 15$; le premier nombre (1) représente l'identité de l'organe, le deuxième (3) représente l'identité du tissu et le troisième (15) représente la cellule. Par conséquent, cette cellule doit créer le tissu 3 de l'organe 1. Ainsi, au niveau de la table d'intérêt de la cellule, la région correspondant au tissu numéro 3 de l'organe 1 sera activée.

4.5 Le réseau cyclique de création (L'exécution du MLAS)

Le Système Autopoïétique à Plusieurs Niveaux (MLAS) est un réseau cyclique dynamique de création. Il représente la machine autopoïétique avec ses deux côtés.

Les nœuds de ce réseau représentent les composants, et les arcs entre eux représentent les interactions et les transformations des composants à trois niveaux différents.

Les composants présents dans les différents niveaux (à l'exception des composants de la cellule « actions ») sont des machines autopoïétiques. En fait, cela fait du MLAS un réseau cyclique global de création de machine autopoïétique globale individuelle (individu de niveau supérieur).

A l'intérieur de ce réseau cyclique global, nous trouvons différents réseaux sous-cycliques de création à différents niveaux. Cela veut dire que nous avons un réseau cyclique à l'intérieur du réseau cyclique de production (4.1). An niveau de chaque cycle de ces réseaux, de nouveaux changements sont produits, nous citons par exemple la création d'un nouveau nœud, de nouveaux des arcs, etc.

Initialement, MLAS commence par un seul nœud « État de l'organe » au niveau supérieur et une seule cellule souche inactive « une machine autopoïétique » au niveau de cellules. Le but de ce réseau cyclique de création (MLAS) est de créer et de réguler chaque machine autopoïétique du système pour atteindre le degré de construction requis pour chaque individu. Ceci est réalisé en atteignant un niveau requis de construction pour chaque état de nœud individuel (état d'organe, état de tissu et état de cellule). Ce niveau de construction requis est exprimé dans le Tableau des seuils par un seuil de construction pour chaque individu.

L'individu organe est le premier individu qui va commencer à se créer par le système MLAS. Le premier nœud de ce réseau de création est "Organ state". Ce nœud contient deux paramètres ; I_Rorg et A_Forg. Ils contrôlent l'apparition de nouveaux nœuds dans le réseau. Pour chaque calcul ou mis-à-jour de A_Forg, nous vérifions si sa nouvelle valeur est supérieure au seuil de l'organe dans la table des seuils. Si c'est le cas, un nouveau nœud « tissue state » est généré dans le réseau. (Figure 4.5).

A_Forg > seuil de l'organe → Nouveau nœud de Tissue state (1)

Ce nœud « Tissue state » va à son tour créer le début d'une nouvelle machine autopoïétique au niveau inférieur (machine autopoïétique tissu). Le réseau de création de tissu va donc commencer par ce nœud, sachant que sa structure sera identique à celle de "Organ state" à l'exception de l'identifiant d'état.

Le « Tissue state » aura comme identifiant celui de l'« Organ state » et l'identifiant du tissu « T_Id ». Il est codé en nombre entier compris entre 1 et N. L'initialisation de la concentration des deux rapports (I_Rtissue, A_Ftissue) dans « Tissue state » est similaire aux concentrations des deux rapports de "Organ state" (I_Rtissue = 0 et A_Ftissue = 1).

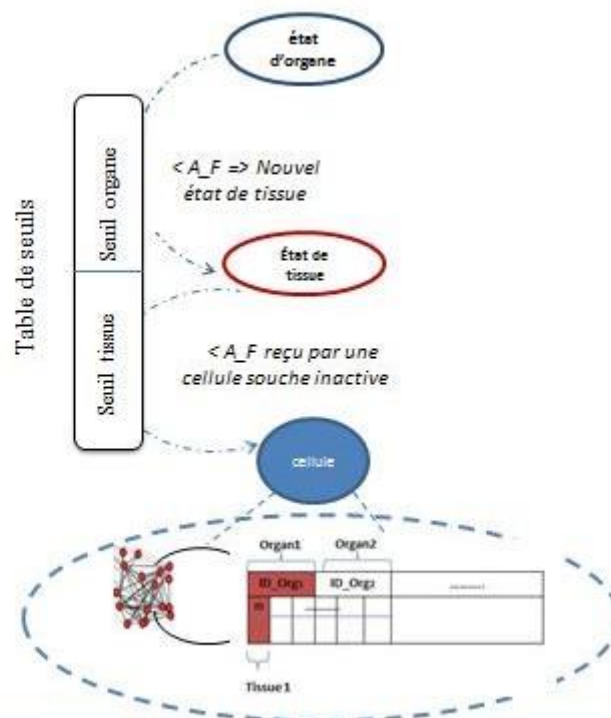


FIGURE 4.5 – L'exécution du premier demi-cercle de MLAS, (a) une partie de la table d'intérêt est active « colorée avec une couleur différente ».

Dans le cas où le paramètre A_F_{tissue} du nœud « tissu state » est supérieur au seuil tissu dans la table des seuils, il sera transmis à la cellule souche inactive (cellule qui n'a pas de régions actives dans sa table d'intérêt). A_F_{tissue} sera responsable de l'activation d'une partie de la table d'intérêt de la cellule souche selon l'identité de « Tissue state ». Lorsqu'une partie spécifique de cette table d'intérêt est active, la cellule saura son intérêt global pour lequel elle va travailler pendant toute sa durée de vie, et cela tant que cette partie de la table d'intérêt est active (figure4.5(a)).

Par ailleurs, dans le cas de non présence de cellules souches inactives (Figure4.6), A_F_{tissue} pourrait être reçu par un autre tissu de l'environnement. Le tissu qui va recevoir ce paramètre sera choisit aléatoirement. Par la suite, le tissu va choisir de manière aléatoire parmi ses composants (cellules) une cellule et va la signaler.

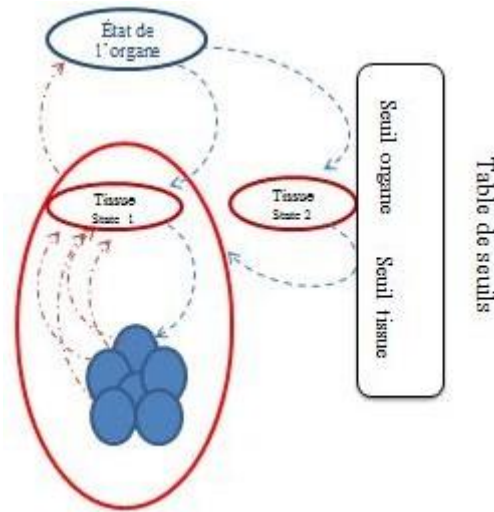


FIGURE 4.6 – Le deuxième cycle du réseau de production du système autopoïétique d'organes

Lorsqu'une partie spécifique de la table d'intérêt de la cellule est active, le troisième niveau de la machine autopoïétique de l'individu va commencer (machine autopoïétique cellule). Le GRN artificiel booléen présent à l'intérieur de la cellule interagit et choisit des actions. A partir des actions effectuées, l'historique de la cellule ¹ est créé et ainsi le GRN artificiel booléen est régulé. Pour chaque action choisie par le GRN booléen artificiel, la cellule va procéder à son évaluation. Cette évaluation modifie le système de mémoire (une partie au niveau du GRN artificiel booléen). Lorsque la cellule a fini d'exécuter les actions, elle calcule son "Individual Report (I_Rcell)". La valeur de ce I_Rcell exprime la réussite de la cellule dans l'accomplissement de son intérêt global.

L'évaluation d'une action : $Eva (Action_i [t])$ est égal à 1, si c'est une "bonne" action. C'est à dire elle influence positivement dans l'intérêt global de la cellule. Dans le cas contraire, l'évaluation de l'action est égal à 0. ². La somme des $Eva (Action)$ sera divisée par le nombre d'actions exécutées par la cellule "N_A". Ce rapport est compris entre [0 et 1], dans lequel le résultat optimal est égal à 1, lorsque l'individu

1. Suite d'actions dans le temps et dans l'espace pour atteindre l'intérêt global de la cellule

2. Voir le GRN booléen artificiel, plus exactement dans section TLOR

n'exécute que les "bonnes" actions. Si "N_A" est égal à 0, le I_Rcell sera égal à 1. Cette concentration de I_Rcell est calculée par l'équation ci-dessous :

$$\begin{aligned} \square & \text{ if } N_A > 0, I_Rcell = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} Eva(Action_i[t])}{N_A} \\ \square & \text{ if } N_A = 0, I_Rcell = 1 \end{aligned}$$

(4.1)

À ce moment-là, le deuxième demi-cercle commence.

Toutes les cellules diffusent leur I_Rcell. I_Rcell sera l'entrée du nœud d'état du tissu pour le tissu pour lequel la cellule travaille. Lorsque l'état tissu reçoit tous les I_Rcell de ses composants (cellules), il va calculer son rapport individuel par l'équation 3. I_Rn de l'état tissu est le total de tous les rapports individuels de ses composants I_Ri (les composants ici sont des cellules), divisé par le nombre de leurs individus des composants "Nind", s'ils sont plus que le nombre minimal. Sinon par le nombre minimal individuels «Nb_min».

$$I_Rn = \frac{Nind}{\sum_{i=1}^{Nind} ((I_Ri + Nb_min) + \| (I_Ri + Nb_min) \| 2)} \quad (4.2)$$

Lorsque toutes les cellules ont diffusé leur I_Rcell vers le nœud d'état de tissu, nous passons de l'individu cellule à l'individu tissu. Cela signifie que le groupe de cellules qui construisent le même tissu sera un individu, qui peut interagir avec son voisin et son niveau supérieur. Ce tissu a un nœud d'état tissu et un groupe de cellules similaires comme illustré dans la figure 4.6.

Lorsque le tissu calcule son I_Rtissu, il l'envoie au niveau de l'organe. Dans cette étape le tissu est considéré comme un composant de la machine autopoïétique de l'organe. Lorsque l'état de l'organe reçoit le rapport de tissu "I_Rtissu", le premier cercle se termine dans le système. Au sein de ce cercle, le réseau crée de nouveaux nœuds, arcs, et modifie même la concentration dans l'état des nœuds des individus.

L'état d'organe reçoit I_R de ses composants (tissus) et recalcule son I_R par l'équation (3). Alors que A_F (qui est le deuxième rapport entre le niveau supérieur et le sous-niveau) pour tous les différents individus (organe, tissu, cellule) est calculé par la différence entre la valeur optimale et son rapport individuel (équation (4)) :

$$A_Fn = 1 - I_Rn \quad (4.3)$$

Si la valeur de A_F est inférieure au seuil organe de la table des seuils, l'individu a atteint le niveau de construction requis. Sinon, le deuxième cercle commence en régénérant un autre nœud d'état tissu. Le même cercle est répété jusqu'à ce que l'énergie se termine ou que le système atteigne le niveau de construction requis. Dans le cas où l'énergie est épuisée, la première cellule souche de l'environnement prend toute l'expérience des autres cellules et passe à la génération suivante (voir la section GRN Artificiel Booléen).

4.6 GRN artificiel booléen avec une partie épigénétique (MLAS au niveau de la cellule)

La plupart des modèles de développement sont étroitement liés aux modèles basés sur le développement cellulaire de la morphogenèse biologique. La spécificité des ces derniers est le développement de structures partant d'une seule cellule jusqu'à un ensemble de fonctions répétées (prolifération, différenciation et apoptose). Le Gene Regulatory Network (GRN) est le mécanisme le plus important qui contrôle ce développement. Par conséquent, de nombreux modèles se sont inspiré du GRN pour simuler la croissance de l'embryogenèse artificielle.

Au cours du processus du développement, le destin des cellules crée la croissance de l'organisme multicellulaire. En fait, les protéines PcG sont les régulateurs essentiels du destin des cellules et du développement embryonnaire. Cela est fait en contrôlant leurs gènes cibles. Ces protéines sont considérées comme faisant partie du plan épigénétique pour le développement et aussi comme une mémoire préprogrammée dans la cellule [Aloia et al., 2013] [Bracken et al., 2006]. L'expression du gène dans les cellules dépend à la fois de la morphologie, des signaux entourant la cellule et de l'historique créé au cours de l'évolution (mémoire préprogrammée). En outre, cette mémoire de cellules peut être modifiée plus tard dans le développement [Maurange and Paro, 2002]. Les protéines PcG semblent former la base moléculaire de la mémoire de la cellule [Ringrose and Paro, 2004]. Elles sont également des acteurs centraux dans divers phénomènes épigénétiques [Bantignies and Cavalli, 2006] et plus tard elles sont considérées comme des gardiens épigénétiques des processus de mémoire de cellules [Schuettengruber and Cavalli, 2009].

En effet, traditionnellement, l'épigénétique a été beaucoup étudiée dans le domaine du développement. Cependant, elle peut également jouer un rôle important dans l'évolution, lorsque les changements épigénétiques sont héréditaires [Mendizabal et al., 2014][Moore, 2015]. L'hérédité épigénétique ajoute une autre dimension à l'image moderne de l'évolution. Dans la théorie de l'évolution de Darwin, le génome se change lentement à travers le processus de mutation aléatoire et de sélection naturelle. En revanche, un changement épigénétique peut se produire chez de nombreux individus

à la fois et transmettre ce changement aux générations futures [Youngson and Whitelaw, 2008]. Une question clé est de savoir comment ce changement épigénétique peut être transmis entre les générations ? Certaines études rapportent l'épigénétique transgénérationnelle. C'est l'héritage direct des modifications épigénétiques qui sont transmis d'une génération à l'autre [Mendizabal et al., 2014][Youngson and Whitelaw, 2008][Daxinger and Whitelaw, 2012].

Inspiré du système de mémoire cellulaire, le rôle de la protéine PcG est de contrôler le développement. Ces protéines font partie du schéma épigénétique du développement et permettent aux cellules de modifier leurs systèmes de mémoire au cours du développement. Nous proposons donc un nouveau type de GRN artificiel booléen avec une partie épigénétique représentée par le système de mémoire cellulaire et le contrôleur de politique. Ce dernier est responsable du choix des actions par les cellules puisque elles peuvent ajouter des changements dans leur système de mémoire au cours du développement et effectuer des changements épigénétiques. Pour transmettre ce changement entre les générations, nous nous sommes appuyés sur des recherches qui rapportent l'hérédité directe de l'épigénétique qui se modifie à la génération suivante "l'épigénétique transgénérationnelle".

L'utilisation de cette partie épigénétique dans notre GRN artificiel booléen devrait présenter certaines capacités. Par exemple, même si nous avons le même génotype, nous pouvons obtenir plusieurs phénotypes ; dans [Vogt et al., 2008] les résultats indiquent que les génotypes des individus en biologie peuvent donner différents phénotypes, malgré le fait qu'ils soient élevés dans le même environnement. Dans notre cas, cela est rendu possible grâce à la capacité des cellules de créer différents systèmes de mémoire. Aussi, grâce à la sélection d'actions qui dépend des signaux externes et de l'historique interne (système de mémoire) de la cellule.

Pour concevoir un processus d'embryogenèse, les cellules doivent savoir ce qu'elles doivent exécuter comme action au cours du processus de développement. Dans notre modèle, à l'intérieur de chaque cellule, il y a un GRN artificiel booléen avec une partie épigénétique. L'objectif principal de ce GRN artificiel est de choisir ce que la cellule doit exécuter à chaque pas du temps du processus de développement et de créer son cheminement d'actions et son historique.

4.6.1 Première couche de régulation (FLOR)

La première couche de régulation se situe à l'extérieur de la cellule. Elle est représentée par un groupe de différents signaux comme il est montré dans la figure 4.7(FLOR). Ce dernier a des rôles importants dans l'embryogenèse, mais le processus est bien plus complexe que de guider simplement le développement par l'extérieur de la cellule. Pour cette raison, notre modèle de développement utilise les signaux

provenant de l'extérieur uniquement comme une première couche de régulation, où chaque changement se produisant à l'extérieur peut modifier d'autres couches de régulation à l'intérieur de la cellule, mais pas nécessairement le destin de la cellule. Par conséquent, l'extérieur de la cellule n'a qu'une influence partielle sur son destin.

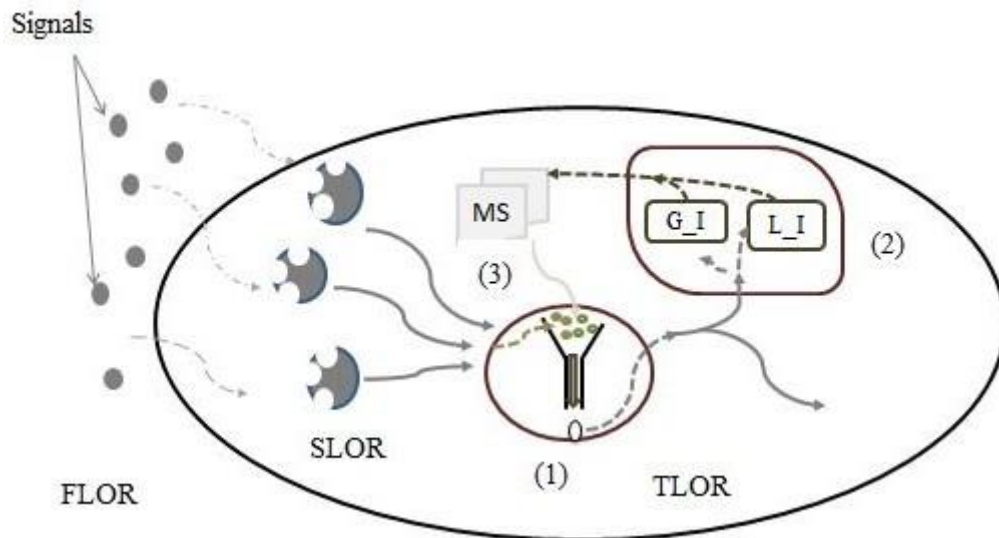


FIGURE 4.7 – Les cellules contrôlées par le GRN artificiel booléen avec ses différentes couches de régulation. FLOR représenté par un groupe de signaux extérieurs, donne à la cellule des informations sur son environnement. Le SLOR est le deuxième niveau de réglementation ; contient un ensemble de gènes représentant toutes les actions cellulaires possibles. TLOR représenté par (1) (2) et (3), est le mécanisme de choix de l'action et de son évaluation.

Les valeurs des signaux dans FLOR sont booléennes. Elles donnent à la cellule des informations concernant son voisinage, son niveau supérieur et son environnement immédiat. Par conséquent, elles peuvent être considérées comme la condition préalable des actions des cellules. Le tableau 5.5 montre les différents signaux ainsi que leurs descriptions et leurs valeurs. Ces signaux peuvent activer plus d'une action en même temps dans la deuxième couche.

4.6.2 Deuxième couche de régulation (SLOR)

Les signaux de la première couche de régulation régulent la deuxième couche de régulation. Ceci est fait à l'intérieur de la cellule où toutes les actions possibles sont représentées par un ensemble de gènes. Les actions permises sont la division, la différenciation, la dédifférenciation, l'apoptose et l'attaque. Ceci représente le lien entre la partie externe et la partie épigénétique de la cellule. Veuillez voir la figure

Tableau 4.1 – Les valeurs des différent signaux dans FLOR

Signals of FLOR		
	Description	Concentration
S	Cell specialization	=1, if cell is not yet specialized (stem), =0, if cell is specialized.
N_T	The difference between cell and their neighbors in type	=1, if cell and its neighbor have the same type, =0, if not.
N_S	Signal diffused by neighbors “ one cell can receive more than one signal”	=1, if exist in the environment, =0, if not.
UpS	Signal from the higher level (from tissue level)	=1, if exist in the environment, =0, if not.
N_F	Neighbor position state	=1, if Neighbor position free, =0, if not.
E	Energy	=1, if Energy > 0, =0, if not.

4.7(SLOR). SLOR a pour but d’assurer la présence de tous les signaux externes dans l’environnement. Cela pour chaque action et durant chaque étape.

Pour activer un ou plusieurs de ces gènes, nous avons besoin de différents types de protéines. « Protéine complexe » est composée de plusieurs signaux provenant de l’extérieur. Pour cela, chaque gène aura besoin d’un nombre fixe de signaux provenant de la première couche que nous avons noté Nb. Le tableau 4.2 montre les différentes actions des gènes et leurs signaux nécessaires. En apoptose, la cellule a besoin de N_S signaux provenant de ses quatre voisins.

Tableau 4.2 – Les différentes actions de la cellule et le signal requis

Gene actions	FLOR						Nb
	S	N_T	N_S	UpS	N_F	E	
Differentiation	x					x	2
Division					x	x	2
Apoptosis			x			x	5
Dedifferentiation				x		x	2
Attack		x				x	2

Pour calculer le statut (actif ou inactif) de chaque gène de cette couche, nous utilisons l’équation suivante :

$$\text{gene}[t]_{\text{action}_j} = \sum_{j=1}^{Nb} \text{FLOR}[t]_{ij} / Nb \quad (4.4)$$

Si tous les signaux nécessaires pour le gène i (protéines FLOR) sont présents, le gène est actif.

La sortie de la deuxième couche est une protéine d'activation ou d'inhibition, et ces sorties seront utilisées comme entrées aux "Policy controller".

4.6.3 Troisième couche de régulation (TLOR)

Cette couche a comme entrée toutes les actions actives du SLOR. TLOR contient le schéma épigénétique du processus de développement qui est représenté par une mémoire programmée dans la cellule (Figure 4.7 (TLOR)). En effet, celle-ci a été créée et programmée au cours de l'évolution. En outre, les cellules (cellules du même type) ont fait évoluer leur système de mémoire pour atteindre ensemble leur intérêt global (partie active dans la Table d'intérêt de la cellule). Les cellules utilisent cette couche pour tenter de choisir l'action appropriée parmi toutes les actions actives à chaque pas de temps du développement. TLOR exécute une boucle de trois parties principales (module d'évaluation, système de mémoire et protéine de politique).

Module d'évaluation

Veillez voir la figure 4.2 SLOR (2) avec deux fonctions d'évaluation :

1. **Intérêt local**: L'intérêt local est intégré dans le comportement de l'individu depuis son apparition dans l'environnement. Il ne change jamais de toute sa durée de vie. Il est considéré comme l'instinct de survie et de reproduction pour chaque cellule comme suit :
 - (a) Rester en vie : Les individus cellules, leur premier intérêt local est de rester en vie autant qu'ils le peuvent
 - (b) Diviser : Le deuxième intérêt local pour les individus cellules est de reproduire une copie d'eux-même.

En fait, l'apoptose est l'action qui ne soutient pas l'intérêt local de la cellule. En revanche, le reste des actions (sauf pour la division) ont une influence neutre.

2. **Intérêt global** : Lorsqu'une partie spécifique de la table d'intérêt de la cellule est active, l'intérêt global est spécifié pour la cellule. Il représente un tissu spécifique, et la cellule va travailler durant sa durée de vie pour participer à la construction de ce tissu.

L'intérêt global restera le même pour la cellule pendant toute sa durée de vie tant que l' ID de la cellule ne change pas. Les actions qui soutiennent l'intérêt global peuvent différer d'une cellule à l'autre même si elles ont le même intérêt global, soit l'action contribue à la construction des bons tissus ou non. La division ne soutiendra

l'intérêt global que si la cellule fille se trouve dans les bordures du tissu spécifique. Par contre, l'apoptose, au-delà des bordures du tissu spécifiques, soutient l'intérêt global de la cellule même si elle ne soutient pas l'intérêt local. Il en va de même si la cellule change de type (actions de différenciation ou de dédifférenciation). Si le type de la cellule est le même pour celui du tissu, cela soutiendra l'intérêt global, sinon, ce ne sera pas le cas, et l'action de signalisation sera représentée comme neutre.

Le choix d'une action par Policy controller (La troisième partie de cette couche) a été évalué par ces deux fonctions, et une note a été donnée. Les actions neutres ont été notées par « 0 » au niveau des deux fonctions d'intérêt, globale et locale. En revanche, les actions qui soutiennent « l'intérêt local » sont notées par « +1 », sinon par « -1 », et dans « l'intérêt global », l'évaluation des actions devrait être plus influencée dans le système. Les actions qui soutiennent cet intérêt sont notées par « +2 », sinon par « -2 ». Le rapport final est la somme des deux rapports précédents. Si sa valeur est supérieure ou égale à zéro, alors elle sera considérée comme une bonne action, sinon c'est une mauvaise action.

Cela peut se résumer par « Moi, individu, je travaille pour mon intérêt personnel, l'intérêt local, tant que cela ne porte pas atteinte à l'intérêt global ». Le rapport final d'évaluation (action avec sa note) est stocké dans la deuxième partie de la couche "mémoire système".

Système de mémoire (Figure 4.2 SLOR (3), Figure 4.8)

Le système de mémoire "MS" dans les cellules est représenté par deux matrices. La première concerne les "bonnes actions" et la seconde concerne les "mauvaises actions". MS contient les cellules et leur acheminement des actions, à la fois pour l'acheminement des bonnes actions et l'acheminement des mauvaises actions. Dans ces deux matrices, les cellules sont représentées par leurs positions et leurs ID. Le cheminement est une suite d'actions à chaque étape de la vie de la cellule. Pour chaque étape de cet acheminement ; nous pourrions trouver plus d'une action. Ces deux matrices sont considérées comme le système de mémoire des. Lorsqu'une cellule apparaît dans le système, elle va choisir le "chemin de la cellule" le plus proche d'elle dans le système de mémoire (même position et même intérêt global) s'il existe.

Les cellules utilisaient le système de mémoire de deux manières. La première façon, le contrôleur de politique l'utilise pour choisir entre les actions. De même, le contrôleur de politique utilise les expériences de la cellule des générations précédentes qui existent dans le système de mémoire. Dans l'autre sens, les cellules mettent à jour ces systèmes de mémoire en ajoutant leur propre expérience à la fin du processus, sachant qu'à la première génération le système de mémoire est vide. D'une génération à l'autre, le module d'évaluation a créé l'historique des cellules "système

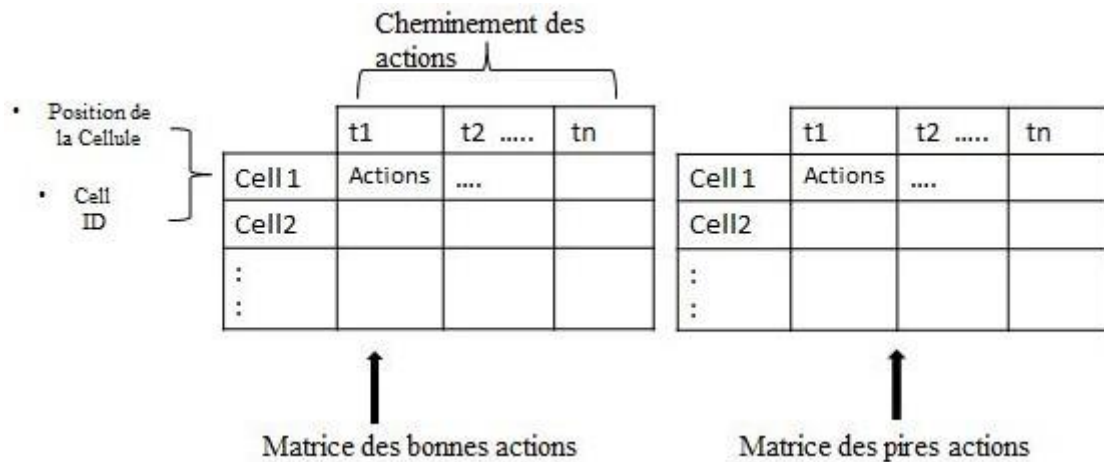


FIGURE 4.8 – Le système mémoire à l'intérieur des cellules

de mémoire". En fin de compte, une cellule passe à la génération suivante après avoir hérité directement de tous les changements survenus dans le système de mémoire grâce à «l'épigénétique transgénérationnelle» de la cellule.

Contrôleur de politique (Figure 4.2 SLOR (1))

Le contrôleur de politique est le médiateur entre les parties épigénétiques et génétiques de la cellule. D'une part, c'est le gardien de la mémoire de la cellule, en prenant en compte l'historique de la cellule lors du choix de l'action. D'autre part, il reçoit tous les gènes actifs d'actions (du SLOR) qui peuvent être mis en œuvre par la cellule. Les actions ont tous les signaux nécessaires de l'extérieur, Contrôleur de politique combinant entre l'historique de la cellule (MS) et les signaux qui existent dans l'environnement, qui sont exprimés par la couche SLOR. Pour sélectionner la bonne action à chaque étape du développement, Policy protein utilise une stratégie pour choisir entre les actions possibles à partir de (SLOR).

Dans un premier temps, le contrôleur de politique se tourne vers le système de mémoire. S'il est vide (pas d'historique pour la cellule), le contrôleur de politique va choisir entre les actions de SLOR de manière aléatoire. Sinon, il va utiliser une étape de filtrage, en calculant l'intersection entre les actions possibles de SLOR et les actions de la matrice des meilleures actions. S'il y a des actions résultantes de cette intersection, le contrôleur de politique va choisir entre les actions de l'intersection en fonction de sa note (le choix préféré est l'action qui a la note la plus élevée). S'il y a plus d'une action qui a la même note, le contrôleur de politique va choisir entre elles

aléatoirement. De plus, s'il n'y a pas d'actions après cette intersection, le contrôleur de politique utilise un autre filtre mais avec la matrice des plus mauvaises actions. Ici, il peut choisir de manière aléatoire entre les actions qui n'appartiennent pas à l'intersection. L'action choisie par le contrôleur de politique entrera dans le module d'évaluation.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté notre modèle de développement de structures sans interventions externes. Le modèle proposé représente un réseau d'auto-crédation et d'organisation avec différents niveaux hiérarchiques pour développer une forme structurée d'organes sans contrôle externe ou central. Dans le prochain chapitre, nous allons valider notre modèle en comparant les résultats obtenus avec ceux présentés dans la littérature.

Résultats expérimentaux

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les expérimentations que nous avons réalisées ainsi que les résultats obtenus. Les expérimentations consistent à réaliser des simulations pour développer des structures en deux dimensions. Différentes formes d'organes ont été développées à l'aide du MLAS dans différentes conditions environnementales. Notre MLAS a réussi à créer différents individus en tant que machine autopoïétique dont lequel il a prouvé une capacité d'autorégulation, auto- création et une auto-organisation au niveau des mécanismes que nous leur avons associés. Chaque individu a pu générer et réguler ses composants à travers son propre réseau de composants de production en tant que 'organisation fermée'.

5.2 Paramètres de l'étude

Afin de tester et évaluer l'efficacité de notre modèle, nous avons mené une série d'expérimentations. Nous présentons tous les paramètres utilisés dans ce qui suit.

Pour toutes les expérimentations réalisées, les simulations commencent toujours avec une seule et même cellule souche dans l'environnement. Cette cellule souche possède un système de mémoire vide, un GRN artificiel booléen irrégulier et des paramètres prédéfinis dans la table d'intérêt. Nous rappelons que ces paramètres sont égaux pour toutes les expériences. Le tableau 5.2 présente le nombre de tissus et la taille prédéterminée pour chacun, tandis que l'énergie pour toutes les expériences est fixée à 500.

Tableau 5.1 – Table des seuils. initialisation des seuils pour chaque tissu et organe

Organe	tissu 1	tissu 1	tissu 1	tissu 1	tissu 1	tissu 1
0.52	0.46	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41

Tableau 5.2 – Table d’intérêts. initialisation à l’intérieur de la cellule. W et H représentent respectivement la largeur et la hauteur de chaque tissu

Organe					
tissu 1 W=4	tissu 2 W=4	tissu 3 W=4	tissu 4 W=4	tissu 5 W=4	tissu 6 W=4
H=14	H=14	H=14	H=14	H=14	H=14

En addition à la cellule souche, nous disposons d’une table de seuils définissant le niveau de construction requis (tableau 5.1). La première cellule souche évolue et se régule avec d’autres cellules qui vont apparaître au fur et à mesure dans le système, et cela afin d’atteindre le niveau de construction requis. Nous exécutons le système 60 fois avec les mêmes paramètres initiaux (Table d’intérêt et Table des seuils).

5.3 Auto-régulation, auto-création et auto-organisation

Pour chacune des exécutions, le système se crée et se régule de différentes man res pour atteindre le niveau de construction requis. La figure 5.1 montre une des morphologies cr ees par le système. Le côté gauche montre la morphologie finale qui a été d velopp e par le système après plusieurs générations d’évolution, sachant que le développement de ces morphologies commence avec une seule cellule. Sur le côté droit, on voit le diagramme qui présente l’exécution des actions au niveau du GRN Booléen Artificiel.

Pour chaque pas de temps du processus de développement, il va y avoir des cellules qui ne vont pas savoir quelles actions elle devraient exécuter afin de développer le tissu requis. Elles vont donc exécuter des actions de manière aléatoire. Le nombre de ces cellules est représenté par « tissue random ». Par contre, le nombre des cellules qui connaissent les actions qu’elles doivent exécuter est repr sent e par « tissue regulated ». Ces cellules sauront les actions à exécuter en fonction de leur système de mémoire (histoire de cellules)

Dans la première génération, toutes les cellules du système vont choisir des actions aléatoirement, et il ne va pas y avoir d’actions r gul es; ceci est dû en fait au système

de mémoire vide présent à l'intérieur des cellules. Les actions choisies au hasard ne sont pas nécessairement de mauvaises actions. Elles peuvent être de mauvaises ou de bonnes actions, cela sera décidé dans le module d'évaluation du GRN Artificiel Booléen.

D'autre part, le système ne va développer qu'un seul tissu. Ceci en fait est causé par la division illimitée de cellules. A ce stade les cellules ne savent pas quand elles doivent arrêter de se diviser.

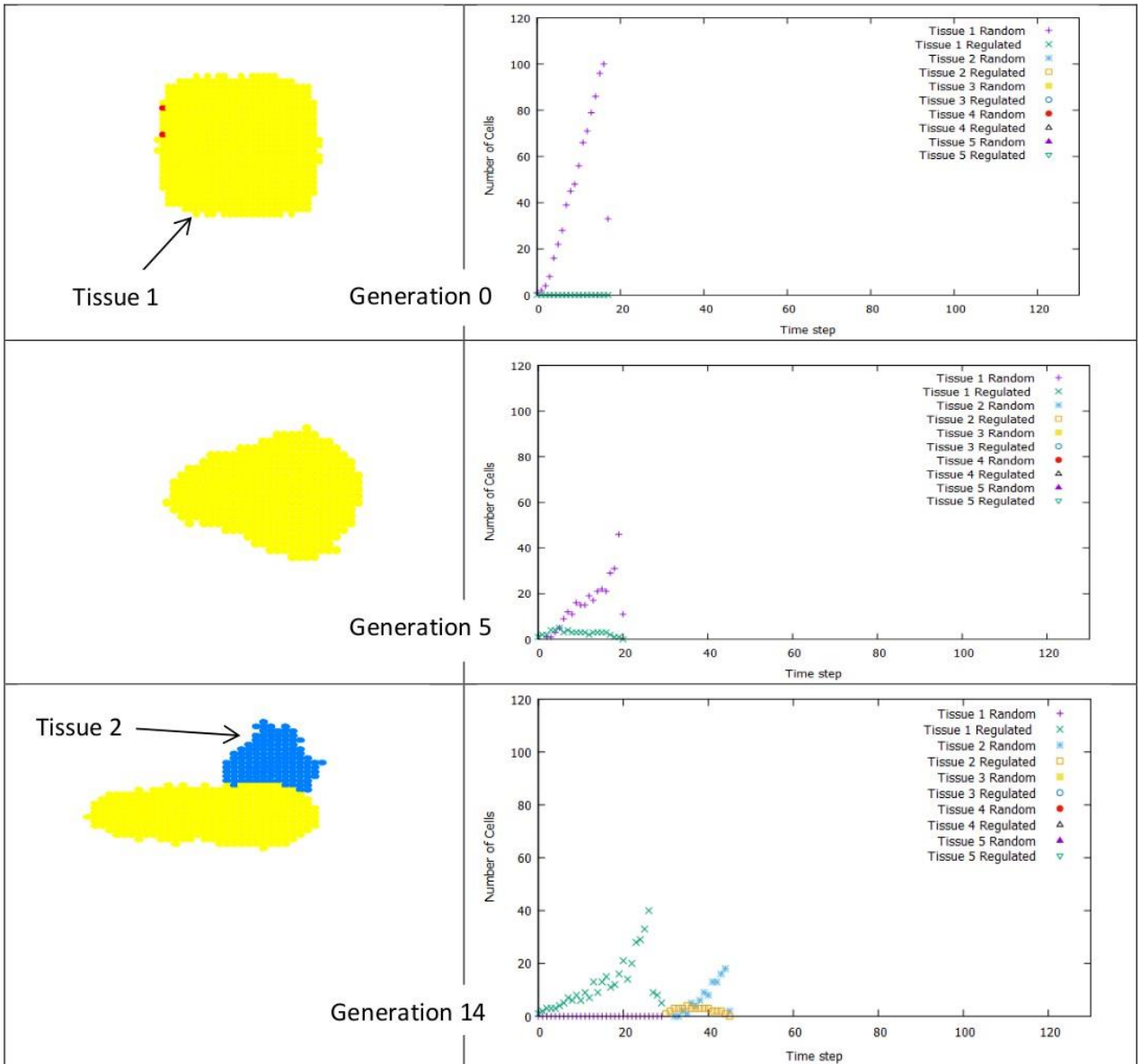
Génération après génération, les cellules acquièrent de l'expérience et créent leurs historiques (système de mémoire), ce qui va aider le GRN Artificiel Booléen à choisir les bonnes actions au bon moment et au bon endroit. Cela signifie la création des composants (actions) de la machine autopoïétique (cellules).

Cette autorégulation du GRN artificiel booléen à l'intérieur de chaque cellule conduit les cellules à se développer et à créer le niveau requis de construction du tissu spécifique (le tissu pour lequel elles travaillent et elles construisent). En d'autres termes, les cellules (composants de la machine autopoïétique tissu) conduisent les tissus à se créer comme on peut le voir à travers les différentes générations. La machine autopoïétique globale (machine autopoïétique organe) crée de nouveaux composants (tissus) au cours de l'évolution, et ce dernier (machine autopoïétique des tissus) régule et crée ses composants (machine autopoïétique des cellules). La machine autopoïétique des organes termine son auto-création lorsqu'elle va atteindre le niveau de construction requis qui est défini dans la table des seuils.

Les morphologies développées des tissus sont différents ; et cela même si elles ont la même taille spécifique à l'intérieur de la Table d'intérêt de la cellule. En fait, le niveau de construction requis (Table des seuils) joue le rôle essentiel avec la Table d'intérêt de la cellule pour créer la morphologie finale.

Au fil des générations, les actions des cellules s'organisent de plus en plus (figure 5.1) en créant leurs cheminements d'actions (système de mémoire). Vers la dernière génération, nous avons quatre tissus, tous ont régulé leurs actions de cellules pour créer le tissu avec son niveau de construction requis. Nous remarquons que le tissu 5 n'est pas encore régulé dans la génération 37, mais l'évolution s'arrête lorsque la machine autopoïétique de l'organe atteint son niveau requis. Ainsi cette machine (organe) autopoïétique, avec ses tissus actuels développés, crée l'organe requis. Elle n'a pas à réguler ou ajouter d'autres tissus.

5.3. Auto-régulation, auto-création et auto-organisation



5.3. Auto-régulation, auto-création et auto-organisation

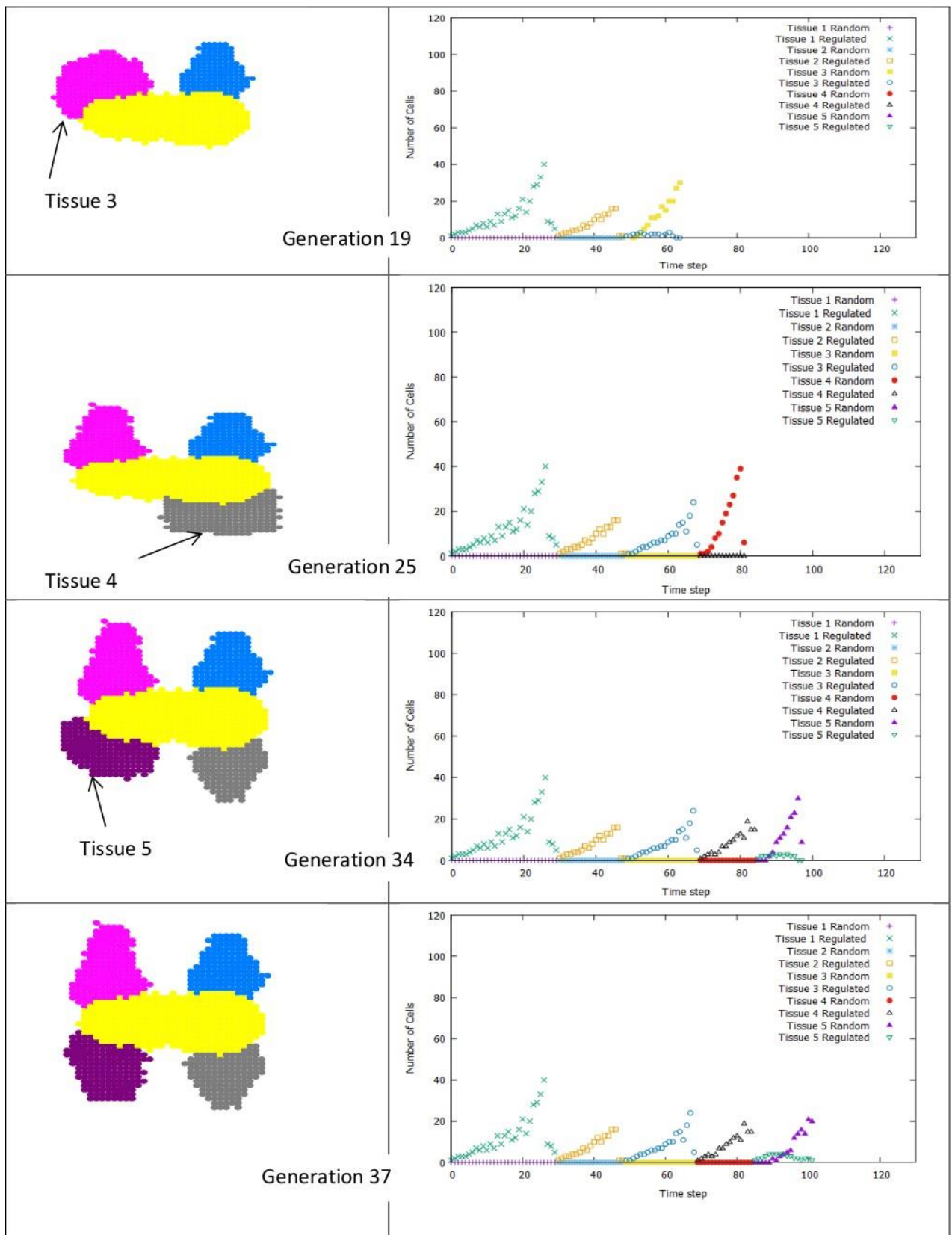


FIGURE 5.1 – A droite, différentes générations du développement de l'organe pour atteindre le Tableau des seuils. A gauche, le diagramme des actions des cellules ex cut es dans le niveau du GRN booléen artificiel dans chaque pas du temps du processus de développement.

5.4 Évolution et diversité comme deuxième processus de la machine autopoïétique

Nous avons vu précédemment le fonctionnement de notre système MLAS et comment il pouvait se créer et se réguler en tant qu'une organisation fermée. Nous présentons ici différentes expériences avec différentes tables de seuils, mais avec la même cellule souche (même nombre et taille de tissus) (voire figure ??).

Pour la même expérience nous lançons le système 60 fois. Nous présentons deux expériences chacune avec une table de seuils différente qui définit les différents niveaux de construction requis des individus (organe et ses tissus). Pour chaque expérience, nous choisissons certains organes évolués et développés par notre MLAS afin d'atteindre le niveau de construction requis. Nous remarquons ici que le système atteint son objectif pour toutes les 60 exécutions, avec des organes convergés et divergés vers différents formes dont certains d'entre elles se montrent symétriques.

L'évolution de la morphologie des organes est le résultat de l'expérience acquise par les cellules d'une génération à l'autre. Nous remarquons que dans les premiers stades de l'évolution, le système développe moins de tissus pour chaque organe avec des formes et des tailles différentes. Cependant, dans les stades avancés de l'évolution, certains tissus minimisent leurs tailles et d'autres apparaissent pour atteindre l'organisation du système. Cela est dû aux nouveaux changements subis aux niveaux des composants de la machine autopoïétique organe. L'évolution se termine lorsque le système crée et régule tous ses composants pour atteindre la table des seuils. Dans le cas contraire, le système passe à la génération suivante et effectue les changements aux niveaux de ses composants. A titre d'exemple, Il va ajouter de nouveaux composants, changer leurs régulations ou leurs tailles.

D'autre part, les deux expériences montrent une diversité dans les solutions du système généré (Figure 5.2), qui est due à la régulation du GRN artificiel booléen à l'intérieur de chaque cellule, exactement au niveau du système mémoire. Chaque cellule crée son propre chemin d'actions (historique de la cellule) en fonction de la sélection aléatoire d'actions choisie par le contrôleur de politique et le module d'évaluation. De plus, chaque cellule fixe son système de mémoire lorsqu'elle atteint le niveau de construction requis de sa machine autopoïétique (tissu), ou le niveau de construction requis de l'ensemble du système (organe). Les différentes régulations du système de mémoire pour chaque cellule, ainsi que les actions de création de leurs composants, ont pour conséquence la création d'une diversité dans les morphologies des organes.

5.4. *Évolution et diversité comme deuxième processus de la machine autopoïétique*

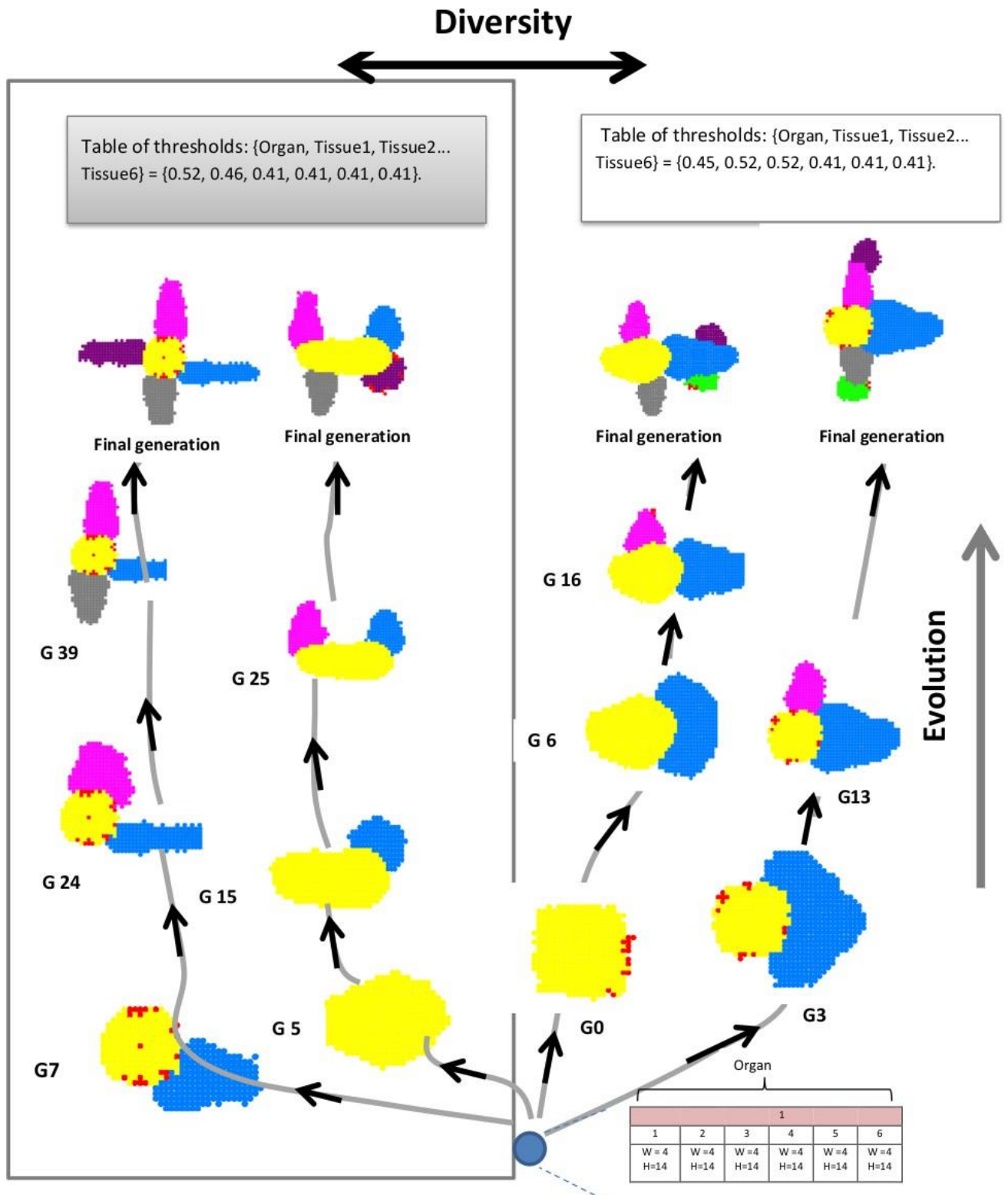


FIGURE 5.2 – Croissance de différentes créatures evo-devo dans différentes conditions environnementales, qui ont commencé par la même cellule. Chaque génération (G = Génération) représente le développement de l'organe multicellulaire qui commence par une seule cellule. Au cours des générations on a une évolution de la morphologie de l'organe multicellulaire.

5.4. Évolution et diversité comme deuxième processus de la machine autopoïétique

Nous pouvons voir sur le coté gauche de la figure 5.3, le résultat de différentes morphologies de créatures développées pour atteindre différentes table de seuils. Nous rappelons que les paramètres de la première cellule souche sont identiques pour toutes les expériences. En revanche, sur le côté droit de la figure, nous pouvons voir un diagramme montrant les concentrations I_R pour chaque créature respectivement. Chaque diagramme montre les rapports individuels (I_R) de l'organe et de ses tissus, et comment chaque individu fait évoluer ses rapports pour atteindre le niveau de construction requis.

A chaque génération, en fin de processus de développement, les individus (cellules, tissus, organes) calculent et diffusent leurs propres Rapport Individuel (I_R) dans l'environnement. Cela va donner l'état de réussite de chaque individu à chaque génération. Lorsque l' I_R de chaque individu va atteindre le niveau de construction requis, cela signifie la terminaison avec succès de son processus de développement ainsi que son processus de régulation.

Au cours des générations suivantes, les cellules vont acquérir de nouvelles expériences dont elles vont faire évoluer la concentration des individus construits (organe ou tissu). Cependant, l' I_R des tissus peut apparaître stable sans évolution sur certaines itérations. Comme on peut voir dans la figure 5.3(c2), vers les itérations entre 0 et 34, la concentration en protéine I_R du premier tissu est fluctuante, où elle n'évolue pas de manière significative. A l'itération 35, la concentration est bien améliorée, et elle atteint le seuil du niveau requis. Cela est dû au fait qu'avant l'itération 34, les cellules apprennent et acquièrent de l'expérience, cependant, certaines autres cellules restent erronées. Mais on remarque ici, que si l'individu organe atteint son niveau de construction requis, on peut voir que certains tissus n'ont pas encore atteint leurs seuils de construction ou qu'ils n'apparaissent pas du tout dans l'environnement. En fait, cela est dû au fait que lorsque le machine autopoïétique va atteindre son niveau de construction requis, elle arrête la régénération de son réseau de composants, ce qui est claire dans le tissu 5 dans la figure 5.3(a2) où le tissu n'atteint pas son seuil de niveau requis. De plus, dans la figure 5.3(a1), la table d'intérêt à l'intérieur des cellules précises le nombre de tissus à 6, alors que le système n'en développe que 5 tissus. Cela signifie que 5 tissus est suffisant pour atteindre la table des seuils.

Mais lorsque nous minimisons le seuil du niveau requis, le système crée plus de tissus (Figure 5.3(c1)). Dans cette exécution nous avons minimisé le seuil à une valeur proche du zéro. Nous remarquons que tous les tissus on été apparus, chacun avec une taille très proche de celle définie dans la table d'intérêt de la cellule. Par conséquent, la morphologie finale de la machine autopoïétique de l'organe dépend de la table des seuils et de la table d'intérêt de la cellule où on a définit les taille des

5.4. Évolution et diversité comme deuxième processus de la machine autopoïétique

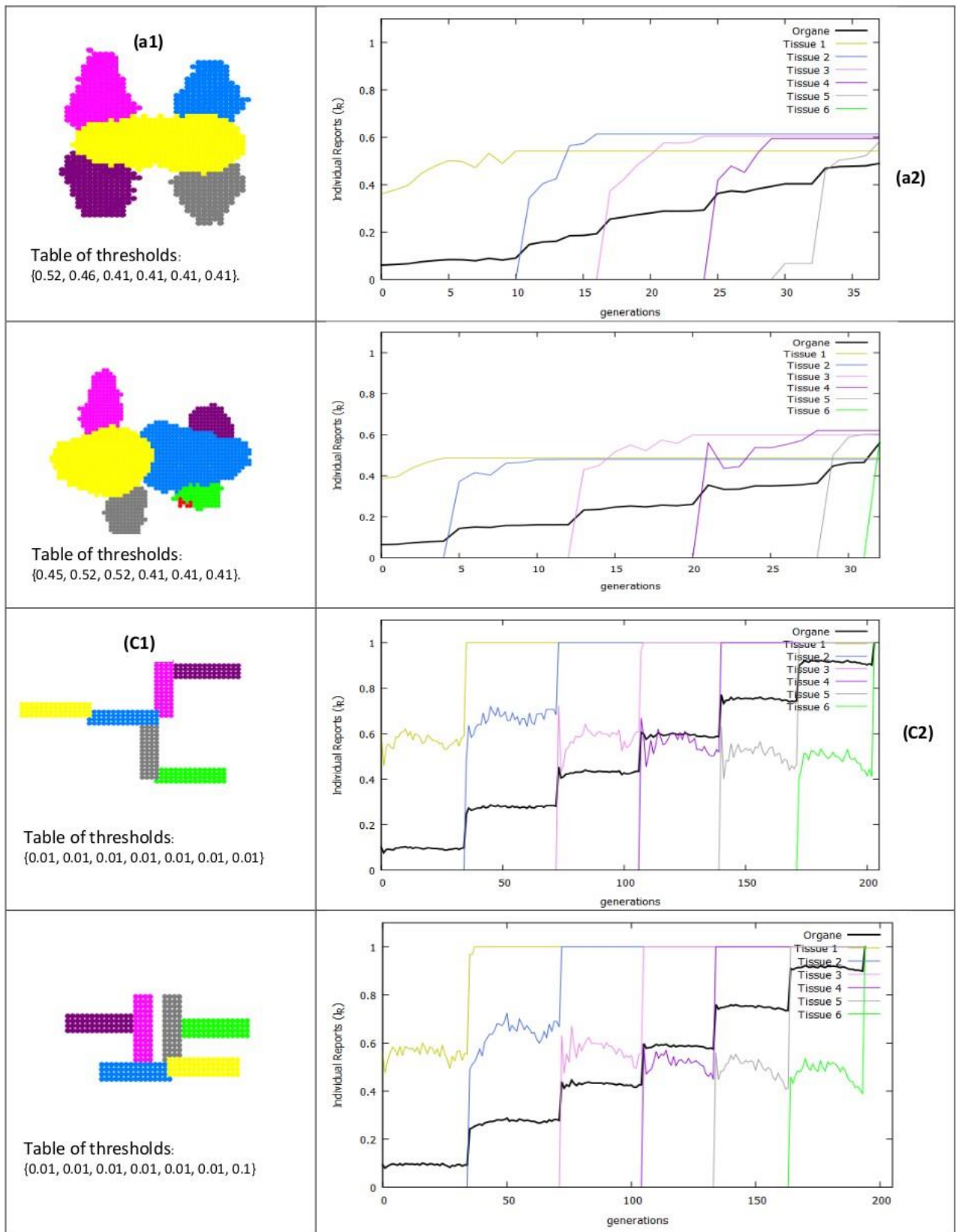


FIGURE 5.3 – Dans la partie gauche de la figure, différents organes se sont développés par MLAS avec différentes tables de seuils. Dans la partie droite, l'évolution des rapports individuels (I_R) pour chaque organe et tissu dans l'environnement.

tissus. Cependant, le système met plus de temps pour atteindre l'organe requis avec des seuils proches de zéro.

5.5 Bilan

Notre modèle montre une approche nouvelle du développement de créatures artificielles. Il a pour but de répondre à certains manques des modèles existants, par exemple donner une fonction aux organismes. Par ailleurs, nous avons ajouté le terme autopoïétique aux différents individus de notre modèle. Dans ce cas la cellule est un système autopoïétique. Nous avons aussi voulu réaliser un modèle en deux dimensions afin de réduire le nombre d'actions possible réalisées par les cellules. Ceci a pour but de se focaliser sur les mécanismes de sélection des actions des cellules afin de produire diverses structures complexes.

Pour résumer les propriétés de notre modèle, nous avons utilisé une base de comparaison axée sur les principales caractéristiques des modèles d'embryogenèse artificielle en établissant trois tableaux n'utilisant que les modèles les plus proches du notre (Rasmussen [Rasmussen et al., 2003], Chavoya Duthen [Chavoya and Duthen, 2008], Knabe [Knabe et al., 2008] Eggenberger Hotz [Hotz, 2004], Joachimczak [Joachimczak and Wróbel, 2008], Cussat-Blanc [Cussat-Blanc et al., 2009]). Ainsi, le tableau 1 résume les propriétés des environnements, le tableau 2 résume les propriétés des cellules et le tableau 3 montre les capacités des organismes. Cette base de comparaison est prise de [Cussat-Blanc, 2009b].

Tableau 5.3 – Table des propriétés des environnements des systèmes de développement.

Environnements			
Modèle	Représentation graphique	Chimie	Action mécanique
Rasmussen	Environnement 2D	Réaliste	Non
Chavoya et Duthen	Matrice 2D et 3D	Diffusion	Non
Knabe	Matrice 2D	Diffusion	Non
Eggenberger Hotz	Environnement 3D	Diffusion	Oui
Joachimczak	Environnement 3D	Diffusion	Oui
Cussat-Blanc	Matrice 2D	Simplifiée	Non
Hiouani	Matrice 2 D	Simplifiée	Non

Tableau 5.4 – Table des propriétés des cellules des systèmes de développement.

Cellule						
Modèle	Forme	Spécialisation	Régulation génétique	Communication	Evolution génétique	Système autopoïétique
Rasmussen	Polygone	Non	Non	Aucune	Non	Non
Chavoya et Duthen	Cercle/Sphère	Couleur	Oui	Indirecte	Oui	Non
Knabe	Polygone	Couleur	Oui	Aucune	Oui	Non
Eggenberger Hotz	Sphère	Non	Oui	Indirecte	Oui	Non
Joachimczak	Sphère	Couleur	Oui	Indirecte	Oui	Non
Cussat-Blanc	Carré	Fonction	Oui	Indirecte	Oui	Non
Hiouani	Sphère	Couleur	Oui	Indirecte	Oui	Oui

Tableau 5.5 – Table des capacités des systèmes de développement.

Capacité					
Modèle	Taille de l'organisme	Forme	Fonction	Diversité	Plusieurs niveaux
Rasmussen	~ 6cellules	Non	Non	Non	Non
Chavoya et Duthen	~ 250cellules	oui	Non	Non	Non
Knabe	~ 100cellules	Oui	Non	Non	Non
Eggenberger Hotz	~ 75cellules	Oui	Non	Non	Non
Joachimczak	≤ 200cellules	Oui	Non	Oui	Non
Cussat-Blanc	~ 500cellules	Oui	oui	Non	Non
Hiouani	≤ 800cellules	Oui	oui	Oui	Oui

5.6 Discussion

Dans notre travail, nous avons essayé d'utiliser la Vie Artificielle (VA) pour implémenter en système automatique une théorie biologique définissant l'organisation et l'autonomie des organismes vivants. Nous avons voulu via cette étude mieux comprendre la théorie de la vie. Ce domaine de recherche (auto-organisation, auto- création et autonomie) reste l'un des domaines les plus importants en vie artificielle. L'étude et la mise en œuvre de cette théorie en VA développe des systèmes à certaines capacités des systèmes vivants. Les résultats générés par notre système MLAS montrent la capacité du système autopoïétique à s'auto-organiser et à s'auto-créeer pour chaque organisme artificiel développé ainsi que pour tous leurs composants

(machine autopoïétique dans tous ses différents niveaux). Cette organisation d'organismes artificiels laisse les organes artificiels se créer par une organisation fermée, ce qui donne lieu à une cohérence émergente ou globale du système sans avoir besoin d'un contrôleur central. Nous remarquons aussi, que MLAS a pu générer plus d'une solution. Cela en fait est l'une des propriétés des organismes vivants. En effet, cette propriété est la base de toute diversité dans la vie. Elle est donc aussi importante que le processus d'évolution pour la compréhension de l'origine de la vie. En outre, le processus d'évolution est aussi apparu comme un deuxième processus par MLAS. Ce résultat inattendu apparu dans notre système qui est basé sur la théorie autopoïétique confirme la suggestion de Maturana et Varela sur l'apparition de tous les autres processus biologiques. Ce sera alors un résultat secondaire de la théorie qui définit l'organisation du système vivant « système autopoïétique ».

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les expérimentations effectuées dans le cadre de notre étude. Les résultats obtenus prouvent la réussite de notre modèle de développement de structures de manière autonome sans intervention externe. Différentes formes d'organes ont été développées dans différentes conditions environnementales. Les individus développés en tant que machine autopoïétique ont montré une capacité d'autorégulation, auto-crédation et une auto-organisation.

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons essayé d'utiliser la Vie Artificielle (VA) pour implémenter un système automatique exploitant une théorie biologique définissant l'organisation et l'autonomie des organismes vivants. A travers l'étude que nous avons entreprise,, nous avons voulu mieux comprendre les fondements théoriques de la vie. Ce domaine de recherche, conjuguant auto-organisation, auto-crédation et autonomie, reste l'un des domaines les plus importants en vie artificielle. L'étude et la mise en œuvre de cette théorie en VA s'est fixée pour objectif de concevoir des systèmes possédant certaines capacités des systèmes vivants. Les résultats obtenus par notre système MLAS montrent la capacité du système autopoïétique à s'auto- créer et à s'auto-organiser pour chaque organisme artificiel développé ainsi que pour tous leurs composants (machine autopoïétique à tous ses différents niveaux). Cette architecture d'organismes artificiels laisse les organes se créer dans un système fermé, ce qui donne lieu à une cohérence émergente ou globale du système sans avoir besoin d'un contrôleur central. Nous remarquons aussi, que MLAS a pu générer plus d'une solution. Ceci représente, en effet, l'une des propriétés des organismes vivants. En effet, cette propriété est la base de toute diversité dans la vie. Elle est donc autant importante que le processus d'évolution pour la compréhension de l'origine de la vie. En outre, le processus d'évolution apparaît également comme un deuxième processus par MLAS. Ce résultat inattendu qui a émergé dans notre système et qui est basé sur la théorie autopoïétique confirme la suggestion de Maturana et Varela sur l'apparition de tous les autres processus biologiques. Il constitue ainsi un résultat secondaire de la théorie qui définit l'organisation du système vivant « système autopoïétique ».

Les résultats obtenus par MLAS ainsi que les intéressantes capacités montrées par notre système (auto-crédation, auto-organisation, évolution et diversité), uniquement avec des objectifs simples, nous incite à réfléchir sur les possibilités de cette théorie aux niveaux les plus élevés et avec des objectifs encore plus complexes. La figure

6.1 présente différents systèmes autopoïétiques à des niveaux plus élevés (organisme et/ou écosystème) qui contiennent différents composants. Ces composants peuvent constituer d'une façon récursive à leur tour d'autres systèmes autopoïétiques et ainsi de suite. Ainsi, l'objectif que nous proposons d'atteindre dans le futur est de reproduire la capacité de « rester en vie ». En effet, les systèmes considérés comme naturels se créent et s'organisent et trouvent des stratégies (être coopératifs ou être concurrents) pour rester en vie, et qu'ils partagent de ce fait le même objectif principal dans leur vie.

Si le système s'organise pour atteindre cet objectif "rester en vie", avec des niveaux plus élevés, les composants de cette machine autopoïétique vont créer de nouvelles relations et transformations entre eux pour conduire cette machine autopoïétique à rester en vie. Dès lors, on peut se demander si l'on pourrait voir la reproduction comme un deuxième processus de cette machine comme suggéré par Maturana, et si la théorie de l'évolution de Darwin en sera un résultat qui se crée uniquement par les interactions et les transformations entre individus (composants).

Vivons-nous à l'intérieur d'un système autopoïétique, et sommes-nous un système autopoïétique à un certain niveau. Et d'ailleurs, l'origine de la vie commence-t-elle avec ces machines (niveau chimie)! Évidemment, il n'est pas facile de répondre à ces questions, mais si nous étudions profondément ce type de systèmes dans la VA et fournissons des résultats qui soutiennent ce que nous avons au niveau biologique, cela peut nous rapprocher davantage aux réponses de certaines de ces questions difficiles.

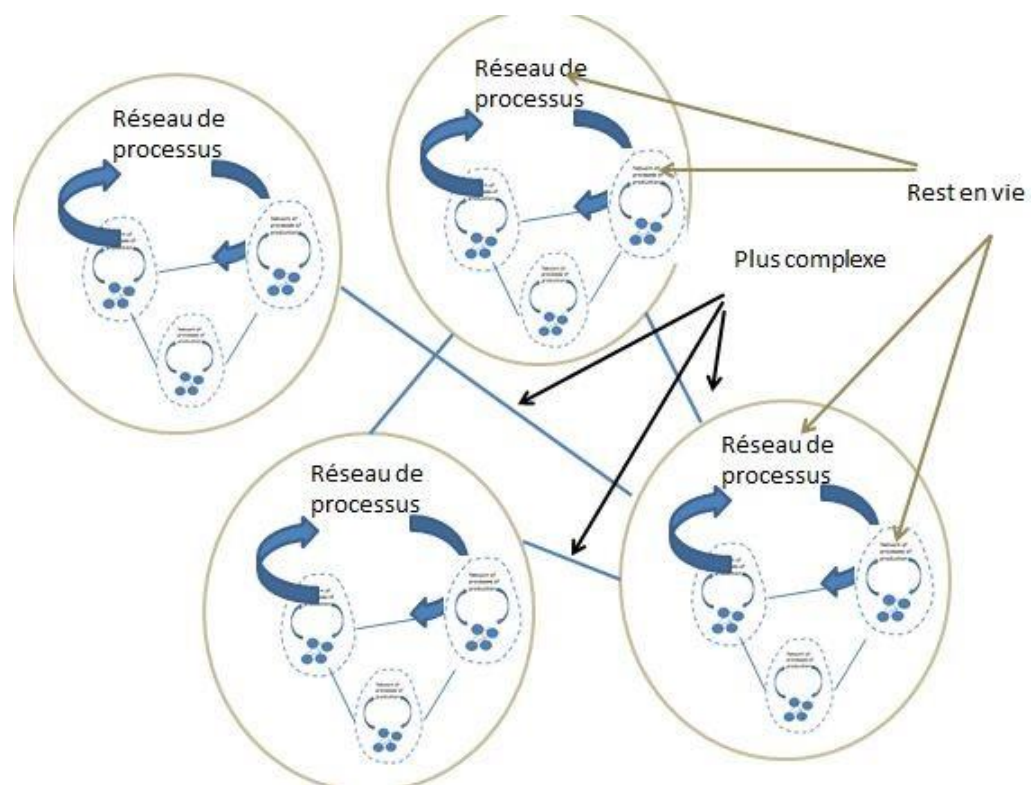


FIGURE 6.1 – Différentes machines autopoïétiques à des niveaux supérieurs .

Bibliographie

- [Agmon et al., 2016] Agmon, E., Gates, A. J., and Beer, R. D. (2016). The structure of ontogenies in a model protocell. *Artificial life*, 22(4) :499–517.(document), 3.3.2,3.8
- [Akrouf et al., 2017] Akrouf, D., Cussat-Blanc, S., Sanchez, S., Djedi, N., and Luga, H. (2017). Joint evolution of morphologies and controllers for realistic modular robots. In *22nd Symposium on Artificial Life And Robotics (AROB 2017)*, pages pp–57.2.4
- [Aloia et al., 2013] Aloia, L., Di Stefano, B., and Di Croce, L. (2013). Polycomb complexes in stem cells and embryonic development. *Development*, 140(12) :2525–2534.4.6
- [Bantignies and Cavalli, 2006] Bantignies, F. and Cavalli, G. (2006). Cellular memory and dynamic regulation of polycomb group proteins. *Current opinion in cell biology*, 18(3) :275–283.4.6
- [Banzhaf, 2003] Banzhaf, W. (2003). Artificial regulatory networks and genetic programming. In *Genetic programming theory and practice*, pages 43–61. Springer. (document),2.4.1,2.8
- [Bedau, 1996] Bedau, M. A. (1996). Philosophical aspects of artificial life.2.3 [Bonabeau et al., 1999] Bonabeau, E., Theraulaz, G., Dorigo, M., Theraulaz, G., Marco, D. d. R. D. F., et al. (1999). *Swarm intelligence : from natural to artificial systems*. Number 1. Oxford university press.3.2.1
- [Bongard et al., 2016] Bongard, J., Laschi, C., Lipson, H., Cheney, N., and Corucci, F. (2016). Material properties affect evolutions ability to exploit morphological computation in growing soft-bodied creatures. In *ALIFE 2016, the Fifteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pages 234–241. MIT press.3.2.5

- [Bongard and Pfeifer, 2003] Bongard, J. C. and Pfeifer, R. (2003). Evolving complete agents using artificial ontogeny. In *Morpho-functional Machines : The new species*, pages 237–258. Springer.[2.4.1](#)
- [Bracken et al., 2006] Bracken, A. P., Dietrich, N., Pasini, D., Hansen, K. H., and Helin, K. (2006). Genome-wide mapping of polycomb target genes unravels their roles in cell fate transitions. *Genes & development*, 20(9) :1123–1136.[4.6](#)
- [Chavoya and Duthen, 2008] Chavoya, A. and Duthen, Y. (2008). A cell pattern generation model based on an extended artificial regulatory network. *Biosystems*, 94(1-2) :95–101.[5.5](#)
- [Coen, 2000] Coen, E. (2000). *The art of genes : How organisms make themselves*. Oxford University Press on Demand.[3.2.1](#)
- [Conlon and Raff, 1999] Conlon, I. and Raff, M. (1999). Size control in animal development. *Cell*, 96(2) :235–244.[4.2.3](#)
- [Cully et al., 2015] Cully, A., Clune, J., Tarapore, D., and Mouret, J.-B. (2015). Robots that can adapt like animals. *Nature*, 521(7553) :503–507.[2.4](#)
- [Cussat-Blanc, 2009a] Cussat-Blanc, S. (2009a). *Créatures artificielles : développement d’organismes à partir d’une cellule unique*. PhD thesis, Université des Sciences Sociales-Toulouse I.[2.4.1,2.4.1,2.4.1](#)
- [Cussat-Blanc, 2009b] Cussat-Blanc, S. (2009b). *Créatures Artificielles : Développement d’Organismes à partir d’une Cellule Unique*.[5.5](#)
- [Cussat-Blanc et al., 2008] Cussat-Blanc, S., Luga, H., and Duthen, Y. (2008). From single cell to simple creature morphology and metabolism. In *ALIFE*, pages 134–141. Citeseer.[\(document\),3.2.5,3.3](#)
- [Cussat-Blanc et al., 2009] Cussat-Blanc, S., Luga, H., and Duthen, Y. (2009). Digital organ cooperation : Toward the assembly of a self-feeding organism. In *European Conference on Artificial Life*, pages 53–58. Springer.[5.5](#)
- [Cussat-Blanc and Pollack, 2012] Cussat-Blanc, S. and Pollack, J. (2012). A cell-based developmental model to generate robot morphologies. In *Proceedings of the 14th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 537–544. [2.4](#)
- [Davidson, 2010] Davidson, E. H. (2010). *The regulatory genome : gene regulatory networks in development and evolution*. Elsevier.[2.4.1](#)
- [Daxinger and Whitelaw, 2012] Daxinger, L. and Whitelaw, E. (2012). Understanding transgenerational epigenetic inheritance via the gametes in mammals. *Nature Reviews Genetics*, 13(3) :153–162.[4.6](#)
- [Day and Lawrence, 2000] Day, S. J. and Lawrence, P. A. (2000). Measuring dimensions : the regulation of size and shape. *Development*, 127(14) :2977–2987. [4.2.3](#)

- [Dellaert and Beer, 1994] Dellaert, F. and Beer, R. D. (1994). Toward an evolvable model of development for autonomous agent synthesis. In *Artificial Life IV, Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pages 246–257. Citeseer.[2.4.1](#)
- [Demetis and Lee, 2016] Demetis, D. S. and Lee, A. S. (2016). Crafting theory to satisfy the requirements of systems science. *Information and Organization*, 26(4) :116–126.[3.3](#)
- [Dempster, 2000] Dempster, B. (2000). Sympoietic and autopoietic systems : A new distinction for self-organizing systems. In *Proceedings of the World Congress of the Systems Sciences and ISSS*, pages 1–18. Citeseer.[3.3.1](#)
- [DJEZZAR, 2010] DJEZZAR, N. (2010). *L’Ontogenèse pour la création de créatures artificielles*. PhD thesis, UNIVERSITE DE MOHAMED KHIDER BISKRA. ([document](#)),[2.2](#),[2.4.1](#)
- [Djezzar et al., 2011] Djezzar, N., Djedi, N., Cussat-Blanc, S., Luga, H., and Duthen, Y. (2011). Bio-inspired artificial creatures for populating virtual worlds. In *2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pages 1–6. IEEE. [2.4](#)
- [Doursat, 2009a] Doursat, R. (2009a). Facilitating evolutionary innovation by developmental modularity and variability. In *Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 683–690.[3.2.5](#)
- [Doursat, 2009b] Doursat, R. (2009b). Organically grown architectures : Creating decentralized, autonomous systems by embryomorphic engineering. In *Organic computing*, pages 167–199. Springer.[\(document\)](#),[2.4](#),[3.2.5](#),[3.2](#)
- [Doursat et al., 2012] Doursat, R., Sayama, H., and Michel, O. (2012). *Morphogenetic engineering : toward programmable complex systems*. Springer.[\(document\)](#),[3.2](#),[3.1](#),[3.2](#),[3.2.1](#),[3.2.2](#),[3.2.3](#),[3.2.4](#),[3.2.5](#)
- [Eggenberger et al., 1997] Eggenberger, P. et al. (1997). Evolving morphologies of simulated 3d organisms based on differential gene expression. In *Proceedings of the fourth european conference on Artificial Life*, pages 205–213.[2.4](#)
- [Ferreira et al., 2018] Ferreira, G., Scheutz, M., and Levin, M. (2018). Modeling cell migration in a simulated bioelectrical signaling network for anatomical regeneration. In *ALIFE 2018 : The 2018 Conference on Artificial Life*, pages 194–201. MIT Press.[2.4](#)
- [Flann et al., 2005] Flann, N., Hu, J., Bansal, M., Patel, V., and Podgorski, G. (2005). Biological development of cell patterns : Characterizing the space of cell chemistry genetic regulatory networks. In *European Conference on Artificial Life*, pages 57–66. Springer.[\(document\)](#),[2.9](#),[2.4.1](#)

- [Gardner, 1970a] Gardner, M. (1970a). The fantastic combinations of jhon conway’s new solitaire game’life. *Sc. Am.*, 223 :20–123.2.4.1,3.3.2
- [Gardner, 1970b] Gardner, M. (1970b). Mathematical games. *Scientific american*, 222(6) :132–140.2.3,2.4.1
- [Hernes and Bakken, 2003] Hernes, T. and Bakken, T. (2003). Implications of self-reference : Niklas luhmann’s autopoiesis and organization theory. *Organization Studies*, 24(9) :1511–1535.3.3
- [Hiller and Lipson, 2011] Hiller, J. and Lipson, H. (2011). Automatic design and manufacture of soft robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2) :457–466.3.2.5 [Hotz, 2004] Hotz, P. E. (2004). Asymmetric cell division in artificial evolution. In *Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 04TH8753)*, volume 2, pages 2180–2186. IEEE.5.5
- [Joachimczak and Wróbel, 2008] Joachimczak, M. and Wróbel, B. (2008). Evo-devo in silico-a model of a gene network regulating multicellular development in 3d space with artificial physics. In *ALIFE*, pages 297–304. Citeseer.5.5
- [Joachimczak and Wróbel, 2012] Joachimczak, M. and Wróbel, B. (2012). Co- evolution of morphology and control of soft-bodied multicellular animats. In *Proceedings of the 14th annual conference on Genetic and evolutionary computa- tion*, pages 561–568.2.4,3.2.5
- [Jones, 2014] Jones, P. H. (2014). Systemic design principles for complex social systems. In *Social systems and design*, pages 91–128. Springer.3.3
- [Kauffman, 1969] Kauffman, S. A. (1969). Metabolic stability and epigenesis in randomly constructed genetic nets. *Journal of theoretical biology*, 22(3) :437–467. 2.4.1
- [Kauffman et al., 1993] Kauffman, S. A. et al. (1993). *The origins of order : Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press, USA.3.2.1
- [Klingenberg, 2002] Klingenberg, C. P. (2002). Morphometrics and the role of the phenotype in studies of the evolution of developmental mechanisms. *Gene*, 287(1- 2) :3–10.4.2.3
- [Knabe et al., 2008] Knabe, J., Schilstra, M., and Nehaniv, C. L. (2008). Evolu- tion and morphogenesis of differentiated multicellular organisms : autonomously generated diffusion gradients for positional information. *Artificial Life XI*.5.5
- [Koos et al., 2012] Koos, S., Mouret, J.-B., and Doncieux, S. (2012). The trans- ferability approach : Crossing the reality gap in evolutionary robotics. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 17(1) :122–145.3.2.5
- [Krah, 2008] Krah, P. (2008). Towards efficient evolution of morphology and control. In *Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary compu- tation*, pages 287–288.2.4

- [Langton, 1995] Langton, C. G. (1995). Artificial life : An overview.2.3
- [Lassabe et al., 2007] Lassabe, N., Luga, H., and Duthen, Y. (2007). A new step for artificial creatures. In *2007 IEEE Symposium on Artificial Life*, pages 243–250. IEEE.2.4
- [Lessin et al., 2014] Lessin, D., Fussell, D., and Miikkulainen, R. (2014). Adopting morphology to multiple tasks in evolved virtual creatures. In *ALIFE 14 : The Fourteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pages 247–254. MIT Press.2.4
- [Li et al., 2008] Li, Y., Zheng, L., Corke, F., Smith, C., and Bevan, M. W. (2008). Control of final seed and organ size by the *dal* gene family in *arabidopsis thaliana*. *Genes & Development*, 22(10) :1331–1336.4.2.3
- [Lindenmayer, 1968] Lindenmayer, A. (1968). Mathematical models for cellular interactions in development i. filaments with one-sided inputs. *Journal of theoretical biology*, 18(3) :280–299.2.4.1
- [Lovelock and Couturiau, 1986] Lovelock, J. E. and Couturiau, P. (1986). *La terre est un être vivant : l’hypothèse Gaïa*. Le Rocher.3.3.1
- [Luhmann, 2020] Luhmann, N. (2020). *Theory of society, volume 1*. Stanford University Press.3.3.1
- [Luisi, 2003] Luisi, P. L. (2003). Autopoiesis : a review and a reappraisal. *Naturwissenschaften*, 90(2) :49–59.3.3.1
- [Maes et al., 1996] Maes, P., Mataric, M. J., Meyer, J.-A., Pollack, J., and Wilson, S. W. (1996). Co-evolution of pursuit and evasion ii : Simulation methods and results.2.4
- [Maturana and Varela, 1980] Maturana, H. R. and Varela, F. J. (1980). Problems in the neurophysiology of cognition. In *Autopoiesis and cognition*, pages 41–47. Springer.3.3
- [Maturana and Varela, 2012] Maturana, H. R. and Varela, F. J. (2012). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*, volume 42. Springer Science & Business Media.3.3
- [Maurange and Paro, 2002] Maurange, C. and Paro, R. (2002). A cellular memory module conveys epigenetic inheritance of hedgehog expression during drosophila wing imaginal disc development. *Genes & development*, 16(20) :2672–2683.4.6
- [McMullin, 2013] McMullin, B. (2013). Computational autopoiesis. In *Encyclopedia of Systems Biology*, pages 461–464.3.3
- [Mendizabal et al., 2014] Mendizabal, I., Keller, T., Zeng, J., and Yi, S. V. (2014). Epigenetics and evolution. *Integrative and comparative biology*, 54(1) :31–42.4.6
- [Mingers, 1989] Mingers, J. (1989). An introduction to autopoiesis—implications and applications. *Systems Practice*, 2(2) :159–180.3.3.1

- [Mingers, 1994] Mingers, J. (1994). *Self-producing systems : Implications and applications of autopoiesis*. Springer Science & Business Media.3.3.1
- [Mingers, 2017] Mingers, J. (2017). Back to the future : A critique of demetis and lee’s “crafting theory to satisfy the requirements of systems science”. *Information and Organization*, 27(1) :67–71.3.3
- [Moore, 2015] Moore, D. S. (2015). *The Developing Genome : An Introduction to Behavioral Epigenetics*. Oxford University Press, USA.4.6
- [Morgan, 1998] Morgan, G. (1998). Images of organization : The executive edition. *Thousand Oaks, CA*.3.3
- [Nelson et al., 2004] Nelson, A. L., Grant, E., Galeotti, J. M., and Rhody, S. (2004). Maze exploration behaviors using an integrated evolutionary robotics environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 46(3) :159–173.2.4
- [Neumann, 1966] Neumann, J. v. (1966). Theory of self-reproducing automata. *Edited by Arthur W. Burks*.2.3,2.4
- [Ouannes et al., 2012] Ouannes, N., Djedi, N., Duthen, Y., and Luga, H. (2012). Gait evolution for humanoid robot in a physically simulated environment. In *Intelligent computer graphics 2011*, pages 157–173. Springer.2.4
- [Pelechano et al., 2008] Pelechano, N., Allbeck, J. M., and Badler, N. I. (2008). Virtual crowds : Methods, simulation, and control. *Synthesis lectures on computer graphics and animation*, 3(1) :1–176.2.4
- [Pelissero, 2017] Pelissero, C. (2017). Pour une approche autopoïétique de l’enseignement/apprentissage.3.3
- [Penelaud, 2010] Penelaud, O. (2010). Le paradigme de l’énaction aujourd’hui. *Apports et limites d’une théorie cognitive «révolutionnaire»*. PLASTIR, 18(1) :1– 35.3.3
- [Prusinkiewicz and Lindenmayer, 2012] Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A. (2012). *The algorithmic beauty of plants*. Springer Science & Business Media.2.4.1
- [Rasmussen et al., 2003] Rasmussen, S., Chen, L., Nilsson, M., and Abe, S. (2003). Bridging nonliving and living matter. *Artificial life*, 9(3) :269–316.5.5
- [Reil, 1999] Reil, T. (1999). Dynamics of gene expression in an artificial genome— implications for biological and artificial ontogeny. In *European Conference on Artificial Life*, pages 457–466. Springer.2.4.1,2.4.1
- [Ringrose and Paro, 2004] Ringrose, L. and Paro, R. (2004). Epigenetic regulation of cellular memory by the polycomb and trithorax group proteins. *Annu. Rev. Genet.*, 38 :413–443.4.6
- [Rowe, 1991] Rowe, P. G. (1991). *Design thinking*. MIT press.2.2

- [Sanchez and Cussat-Blanc, 2014] Sanchez, S. and Cussat-Blanc, S. (2014). Gene regulated car driving : using a gene regulatory network to drive a virtual car. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 15(4) :477–511.2.4
- [Sayama, 2009] Sayama, H. (2009). Swarm chemistry. *Artificial life*, 15(1) :105–114.3.2.3
- [Schuettengruber and Cavalli, 2009] Schuettengruber, B. and Cavalli, G. (2009). Recruitment of polycomb group complexes and their role in the dynamic regulation of cell fate choice. *Development*, 136(21) :3531–3542.4.6
- [Sims, 1994] Sims, K. (1994). Evolving 3d morphology and behavior by competition. *Artificial life*, 1(4) :353–372.2.4,2.4.1
- [Thalmann and Musse, 2012] Thalmann, D. and Musse, S. R. (2012). *Crowd simulation*. Springer Science & Business Media.2.4
- [Turing, 1990] Turing, A. M. (1990). The chemical basis of morphogenesis. *Bulletin of mathematical biology*, 52(1) :153–197.2.3
- [Turney, 2020] Turney, P. D. (2020). Symbiosis promotes fitness improvements in the game of life. *Artificial Life*, 26(3) :338–365.(document),3.3.2,3.9
- [Ulam, 1962] Ulam, S. (1962). On some mathematical problems connected. *Mathematical Problems in the Biological Sciences*, 14 :215.2.4.1
- [Valentinov, 2015] Valentinov, V. (2015). From equilibrium to autopoiesis : A Luhman- nian reading of veblenian evolutionary economics. *Economic Systems*, 39(1) :143– 155.3.3
- [Van Steen and Tanenbaum, 2002] Van Steen, M. and Tanenbaum, A. (2002). Distributed systems principles and paradigms. *Network*, 2 :28.3.2.2
- [Varela et al., 1974] Varela, F. G., Maturana, H. R., and Uribe, R. (1974). Auto- poiesis : The organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems*, 5(4) :187–196.3.3.1
- [Vogt et al., 2008] Vogt, G., Huber, M., Thiemann, M., van den Boogaart, G., Schmitz, O. J., and Schubart, C. D. (2008). Production of different phenotypes from the same genotype in the same environment by developmental variation. *Journal of Experimental Biology*, 211(4) :510–523.4.6
- [Wolfram, 1983] Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 55(3) :601.2.4.1
- [Yosinski et al., 2011] Yosinski, J., Clune, J., Hidalgo, D., Nguyen, S., Zagal, J. C., Lipson, H., et al. (2011). Evolving robot gaits in hardware : the hyperneat generative encoding vs. parameter optimization. In *ECAL*, pages 890–897.2.4
- [Youngson and Whitelaw, 2008] Youngson, N. A. and Whitelaw, E. (2008). Trans- generational epigenetic effects. *Annu. Rev. Genomics Hum. Genet.*, 9 :233–257.4.6

