

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER
BISKRA-ALGÉRIE
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES ET DES
SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
ECOLE DOCTORALE : MATHÉMATIQUES-
INFORMATIQUE-TELÉCOMMUNICATIONS
DE TOULOUSE (MITT)



Thèse en Co-tutelle

présentée pour l'obtention du diplôme de

Docteur en sciences

spécialité

Informatique

Evolution et adaptation de comportements de créatures artificielles dans un écosystème simulé

Présentée par : Nesrine OUANNES

Jury :

Pr NourEddine DJEDI	Université de Biskra, Algerie	Directeur Algérien
Pr. Yves DUTHEN	Université de Toulouse 1, France	Directeur Français
Pr. Hervé LUGA	Université de Toulouse 1, France	Co-Encadremen
Pr Mouloud KOUDIL	Ecole Supérieur d'Informatique, Alger	Président
Pr Samy AIT-AOUDIA	Ecole Supérieur d'Informatique, Alger	Examinateur
Pr Kadi BOUATOUCH	Université de Rennes 1, FRANCE.	Examinateur
Pr Salima HASSASS	Université de Lyon 1, FRANCE.	Examinateur

Année Universitaire 2014/2015

Dédicace

À mes cher parents,

Et mes soeurs.

Remerciements

Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je remercie ensuite mon encadreur monsieur le Professeur NourEddine Djedi, de m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail, de ses précieux conseils, de sa disponibilité, de sa confiance scientifique en moi, de ses discussions très riches qui m'ont fait beaucoup apprendre dans la recherche scientifique, et surtout pour ses corrections détaillées.

Mes remerciement vont également à mon encadreur français monsieur le Professeur Yves Duthen de l'université de Toulouse 1, d'abord pour m'avoir accueilli chaleureusement dans son équipe de recherche pendant plus de sept années, de m'avoir toujours encouragé et aidé tout au long de ses années de collaboration.

Je remercie également, mon co-encadreur français monsieur le Professeur Hervé Luga du laboratoire IRIT de Toulouse, pour ses réponses les bien choisis, et de m'avoir toujours bien compris et aidé.

Je voudrais tout particulièrement remercier mon collègue Dr. Abdelhamid Djefal, de son soutien et encouragement et de sa grande aide dans la rédaction de ma thèse.

Un spécial remerciement est destinée au Dr. Nicolas Chaumont de Stanford University aux états unis, cette personne que j'ai jamais rencontré mais qui m'était très utiles dans l'aspect recherche culture et langue, et qui est très généreux scientifiquement et amicalement.

Mes remerciements vont également aux membres de jury : Pr Mouloud Koudil, Pr Samy Ait-Aoudia, Pr Kadi Bouatouch, et Pr Salilma Hassas pour m'avoir honoré par leur évaluation de ce travail.

Un grand merci va également à l'ensemble des membres du laboratoire LESIA avec qui je partage bien plus qu'un lieu de travail.

Je désire aussi remercier tous mes amis qui ont du me supporter.

Résumé

De par son enjeu écologique important, l'étude des relations des êtres vivants entre eux et avec leur environnement est un défi majeur de la biologie. Le travail de cette thèse s'inscrit dans le cadre de la vie artificielle, domaine scientifique destiné à l'étude du vivant par la création de phénomènes naturels dans des systèmes de synthèse. Le but de la recherche consiste à exploiter la force des techniques évolutionnaires pour faire émerger des comportements de créatures artificielles, dans un écosystème simulé. La problématique générale de cette thèse est de faire évoluer des créatures artificielles capables de comportements de recherche de nourriture. Deux modèles ont été développés. Le premier modèle consiste à exploiter la chimiotaxie bactérienne afin de surmonter les problèmes de détection des ressources (ou de l'environnement). La voie chimiotactique d'une cellule est modulée par une approche hybride qui utilise un modèle algébrique de l'activité des groupes récepteurs, et des équations différentielles pour la dynamique d'adaptation, ainsi qu'un modèle métabolique qui convertit des nutriments en biomasse. Dans la partie résultats, nous avons développé une certaine analyse du mouvement obtenu à partir de certaines bactéries et leur influence sur le comportement de la population évoluée. Nous avons pu constater que le processus évolutif améliore la capacité des bactéries à réagir dans leur environnement ainsi que leurs capacités de croissance leur permettant de mieux survivre. Ensuite, nous avons étudié l'effet de la communication bactérienne qui permet de faire émerger de nouvelles espèces, et qui explore la dynamique des colonies. Certains des comportements obtenus ont été testés dans des environnements différents afin de montrer la façon dont la communication bactérienne peut affecter leurs comportements. Le deuxième modèle est celui du développement de créatures 3D physiquement simulées (les herbivores) qui se nourrissent des ressources disponibles dans leur milieu. Un algorithme génétique couplé à un réseau de neurones artificiel ont été mis en œuvre afin de garantir l'émergence de certains de ces comportements tels que la recherche de nutriments qui sont disposés à différents endroits dans l'écosystème artificiel. Le processus évolutif utilise les propriétés physiques des créatures virtuelles et une fonction multi-objective externe qui mèneront aux comportements espérés. L'expérience consistant à faire évoluer des créatures virtuelles possédant des capacités de locomotion montre que ces créatures virtuelles tentent d'obtenir au moins une des sources alimentaires disposées sur leurs trajectoires. Nos meilleures créatures sont capables d'atteindre plusieurs sources alimentaires durant le temps imparti à la simulation.

Les mots clés : La vie artificielle, Créature artificielle, Chimiotaxie bactérienne, Ecosystème virtuel, fouragement.

ملخص

بسبب أهميتها الإيكولوجية ، تمثل دراسة التفاعلات بين الحيوانات وكذلك مع بيئتهم أحد المحاور الهامة للبحوث ذات الاهتمامات الرئيسية في علم الأحياء.

العمل المدروس في هذه الأطروحة ينتمي لمجال الحياة الاصطناعية الذي يمثل محور البحث العلمي المكرس لدراسة الظواهر الطبيعية الملازمة للكائنات الحية عن طريق استنساخها بالنظم الاصطناعية.

والهدف من هذا البحث هو استغلال قوة تقنيات التطورية قصد خلق و دفع بالظهور لسلوكيات مخلوقات اصطناعية في محاكاة نظام بيئي.

و تمثل الإشكالية الشاملة من هذه الرسالة في بعث هذه المخلوقات (بكتريا) إلى أن تطور من سلوكياتها قصد أن تحسین قدراتها باستخدام علف في المخلوقات الاصطناعية.

وفي هذا الصدد، قد تم تطوير نموذجين.

- النموذج الأول يستغل الكيمياء البكتيرية للتغلب على مشكلة الكشف عن الموارد (أو الميزات في بيئته). وضمان مسار الانجذاب الكيميائي للخلية عن طريق نهج هجين يستنسخ نشاط مجموعة المستقبلات باستخدام نموذج جبري، وديناميكيات التكيف باستخدام المعادلات التفاضلية، وكذلك نموذج التمثيل الغذائي الذي يحول المواد الغذائية إلى كتلة حيوية.

في قسم النتائج، قمنا بتطوير نوع من التحليل للحركة المنجزة من طرف البكتيريا المختارة وتأثيرها على سلوك متطور لسكان هذه البيئة. لاحظنا أن العملية التطورية تحسن قدرة البكتيريا على التفاعل مع بيئتها وكذلك قدرتها على النمو، وتحسن فعالية قدرتها على البقاء على قيد الحياة.

و قد تمت دراسة تأثير الاتصالات البكتيرية التي تسمح بظهور أنواع جديدة ، والتي تستغل ديناميكيات مستعمرة. وقد تم اختبار بعض السلوكيات التي تم الحصول عليها في بيئات منفصلة من أجل إظهار كيفية التواصل بين بكتيريا وكيف يمكن لها أن تؤثر في سلوكها.

- النموذج الثاني هو عن تطوير ثلاثي الأبعاد لمخلوقات محاكاة بطريقة واقعية جسديا (الحيوانات العاشبة) التي تتغذى على الموارد المتاحة في البيئة المحيطة بها. و في هذا الإطار، تم استغلال الخوارزمية الجينية بالإضافة إلى الشبكة العصبية قصد ضمان تجلي مجموعة متنوعة من السلوكيات مثل البحث عن العناصر الغذائية التي تنتشر عبر النظام البيئي الظاهري.

وقد تم ملاحظة أن العملية التطورية تستفيد من الخصائص الفيزيائية للمخلوقات الافتراضية التي تؤدي إلى وظائف متعددة الوسائط و التي من شأنها أن تؤدي إلى السلوك المتوقع.

من جهة أخرى، توضح التجارب المنجزة تطور المخلوقات الافتراضية التي تظهر قدرات تنقل تبين قدراتها الوصول إلى واحد على الأقل من مصادر الغذاء الموضوعة على طول مسارها.

أفضل المخلوقات التي تم انشاؤها قادرة على الوصول إلى مصادر غذاء متعددة ضمن الوقت المسموح به في المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: الحياة الاصطناعية، المخلوقات الاصطناعية، الكيمياء البكتيرية، النظام البيئي الظاهري.

Abstract

Because of its important ecological underpinnings, the study of interactions between animals as well as with their environment is a research area of major interest in Biology. The work in this thesis belongs to the field of Artificial Life, a scientific discipline devoted to the study of natural phenomena inherent to living organisms by reproducing them by synthetic means. The aim of this research is to exploit the power of evolutionary techniques to cause behaviors of artificial creatures to emerge in a simulated ecosystem. The overarching problematic of this thesis is to evolve foraging behaviors in artificial creatures. Two models have been developed. The first model exploits bacterial chemotaxis to overcome the problem of resource detection (or features in its environment). The cell chemotactic pathway is modulated by a hybrid approach that reproduces the receptor group activity using an algebraic model, the adaptation dynamics using differential equations, as well as a metabolic model that converts nutrients into biomass. In the results section, we developed a type of analysis of motion from selected bacteria and their influence on the evolved population's behavior. We observed that the evolutionary process improves the bacteria's capacity to react to their environment as well as their ability to grow, effectively improving their ability to survive. We then studied the effect of bacterial communication that allows new species to emerge, which exploits colony dynamics. Some of the obtained behaviors have been tested in separate environments in order to show how inter-bacterial communication can impact their behavior. The second model is about the development of 3D physically realistic creatures (herbivores) that feed on resources available in their environment. A genetic algorithm coupled to a neural network guarantees the emergence of a variety of behaviors such as the search of nutrients that are spread across the virtual ecosystem. The evolutionary process takes advantage of the virtual creature's physical properties and an external multimodal fitness function to lead to the expected behaviors. Experiments designed to evolve virtual creatures displaying locomotion abilities shows that they attempt to reach at least one of the food sources placed on their trajectory. Our best creatures are able to reach multiple food sources within the imparted simulation time.

Key words : Artificial Life, Artificial creatures, Bacterial Chemoatxis, Virtual Ecosystem, Foraging behavior.

Publications et Communications

Les publications et les communications relatives à cette thèse sont les suivantes :

Publications

1. N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Modeling a bacterial ecosystem through chemotaxis simulation of a single cell. AROB Journal Springer Japan, 19(4) : 382-387, 2014.
2. **Chapter Book** : N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Following food sources by artificial creature in a virtual ecosystem. VIRTUAL WORLDS - Artificial Ecosystems and Digital Art Exploration, pages 99-116, 2012.
3. **Chapter Book** : N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Gait evolution for humanoid robot in a physically simulated environment. in : Intelligent Computer Graphics 2011 book-Springer . Dimitri Plemenos, Georgios Miaouis (Eds.), SCI 374, pages 157-173, 2011

Communications

1. N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, H. Luga. A Predator-Prey Scenario in a Virtual Ecosystem. In the Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Life in York, United Kingdom, 20-24 July 2015. MIT Press. Page 463.
2. N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Predator-Prey Coevolution in a Physically Simulated Environment. In 3rd International Conference on Control, Engineering and Information Technology, CEIT'15, Tlemcen, Algeria, 25-27 May, 2015.
3. N. Ouannes, N. Djedi, H. Luga and Y. Duthen. Modeling a Bacterial Ecosystem Through Chemotaxis Simulation of a Single Cell. The Nineteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2014 (AROB 19th 2014), B-Con Plaza, Beppu, Japan, January 22-24, 2014 (**Best paper Award**).
4. N. Ouannes, N. Djedi, H. Luga and Y. Duthen. Modeling bacterial chemotaxis inside a cell. In Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference on, pages 32-37. IEEE, 2014.
5. N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen et H. Luga. Toward the construction of a virtual ecosystem by evolving virtual creature's behaviours. Multimedia Computing and Systems (ICMCS). IEEE, 2012. International Conference on, pages 350-355, 2012.

6. N. Ouannes, N. Djedi, H. Luga and Y. Duthen. Evolving Following Behaviours In A Simple Ecosystem. In the Second International Conference on Complex Systems (CISC'11), Jijel, December 06 - 08, 2011.
7. N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen et H. Luga. Synthèse de mouvement de créatures artificielles dans un écosystème artificiel. Traitement et Analyse de l'information méthodes et applications, TAIMA'2011 Hammamet, (Tunisie), 3-8 Octobre 2011.
8. N. Ouannes, N. Djedi, Y. Duthen et H. Luga. A bio-inspired approach for the control of humanoid robot in a physically simulated environment. 3IA'2011 (The Fourteenth International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence), Athens (GREECE), 27 - 28 of May, 2011.

Table des matières

Table des matières	I
Table des figures	III
Liste des tableaux	V
1 Introduction générale	1
1.1 Cadre de la thèse	1
1.2 La bio-inspiration	2
1.3 Problématique	2
1.4 Contributions	3
1.5 Organisation de la thèse	4
2 Vie et Vie Artificielle	6
2.1 Introduction	6
2.2 La vie sur Terre	7
2.2.1 Origines de la vie	7
2.2.2 Définition de la vie	7
2.3 Vie artificielle	9
2.3.1 Avènement des automates	9
2.3.2 Vers une discipline scientifique	10
2.3.3 Naissance de la vie artificielle	10
2.4 Quelques motivations biologiques	11
2.4.1 Biologie synthétique	11
2.4.2 Evolution naturelle dans le milieu artificiel	12
2.4.3 Décès (la mort) artificielle	12
2.5 Organisation des systèmes de vie artificielle	13
2.5.1 Niveau moléculaire	13
2.5.2 Cellules artificielles	13
2.5.3 Agents autonomes	14
2.5.4 Niveau population	15
2.6 Implications philosophiques de la vie artificielle	16
2.6.1 Emergence	16
2.6.2 Evolution	17
2.6.3 La vie	17

2.6.4	L'esprit	19
2.6.5	Éthiques	19
2.7	Les applications de la vie artificielle	20
2.8	Les créatures artificielles	20
2.9	Conclusion	22
3	Les écosystèmes Artificiels	23
3.1	Introduction	23
3.2	Ecosystème Naturels	24
3.3	Les Écosystèmes artificiels	24
3.3.1	Considérations de design pour un écosystème informatique	24
3.3.2	Écosystèmes artificiels bactériens	25
3.3.3	Les écosystèmes artificiels de calcul	28
3.3.4	Synthèse	36
3.3.5	Autres écosystèmes	40
3.3.6	Synthèse	47
3.3.7	Les Écosystèmes artificiels dans l'Art	49
3.4	Conclusion	52
4	La modélisation d'un écosystème bactérien par la simulation d'un réseau de chimiotaxie	53
4.1	Introduction	53
4.2	Synthèse de travaux reliés	55
4.3	Le chimiotaxie	56
4.4	L'écosystème bactérien	57
4.4.1	Le réseau de chimiotaxie	59
4.4.2	Le Métabolisme Bactérien	60
4.4.3	La Représentation génétique	62
4.5	Paramètres expérimentaux	63
4.5.1	Algorithme générale du mouvement	64
4.6	Résultats expérimentaux	65
4.6.1	Résultats de Fourragement sans recyclage	66
4.6.2	Résultats de Fourragement avec recyclage de la matière	69
4.7	Discussion	72
4.8	Communication entre bactéries	74
4.8.1	Phénomène du 'Quorum Sensing'	74
4.8.2	La simulation du Quorum Sensing	75
4.9	Récapitulatif des résultats obtenus	78
4.10	Limites du modèle	79
5	Évolution du comportement de recherche de nourriture par des créatures artificielles dans un écosystème physiquement simulé.	82
5.1	Introduction	82
5.2	Description	83
5.3	Le Modèle de la Créature Artificielle	84
5.4	Le Contrôleur de la Créature Artificielle	86
5.4.1	Senseurs et Effecteurs	87
5.5	Le Flux d'énergie	89

TABLE DES MATIÈRES

5.6	L'évolution	89
5.6.1	Le Génome	90
5.7	Expérimentation 1 : Recherche de nourriture	91
5.7.1	Conditions expérimentales	91
5.7.2	Paramètres d'évolution	92
5.7.3	La fonction de fitness	93
5.7.4	Validation de l'expérimentation	95
5.7.5	Analyse des résultats	98
5.8	Expérimentation 2 : Poursuite et évation	102
5.8.1	Conditions expérimentales	103
5.8.2	Paramètres d'évolution	103
5.8.3	La fonction de fitness	104
5.8.4	Le processus de coévolution	105
5.8.5	Validation de l'expérimentation	106
5.8.6	Analyse des résultats	108
5.9	Récapitulatifs des résultats obtenus	110
5.10	Limites du modèle	110
6	Etude Comparative	111
6.1	Introduction	111
6.2	Les écosystèmes de créatures virtuelles	111
6.3	Les écosystèmes bactériens unicellulaires	114
6.4	Bilan	115
7	Conclusion et Perspectives	117
7.1	Introduction	117
7.2	Conclusion Générale	117
7.3	Perspectives	118
7.3.1	Proposition d'un écosystème 3D	118
	Bibliographie	122

Table des figures

1.1	Architecture globale de l'écosystème artificiel	4
3.1	Tierra : Les programmes les plus petits en jaune sont des parasites	30
3.2	Ces images montrent l'évolution d'une colonie d'organismes digitaux au sein du logiciel Avida	31
3.3	Capture d'écran du simulateur écologique PolyWorld.	32
3.4	Gene Pool 5.	34
3.5	Une capture d'écran de la première version de LifeDrop	36
3.6	Un aperçu d'un monde avec trois types de ressources (sphères vertes, rouges et bleu) qui nécessitent différentes morphologies.	43
3.7	Comportement évolué de suivi de proie par des prédateurs.	44
3.8	Un prédateur (en violet) à la poursuite d'une proie (en vert), qui, à son tour, suit un objet (la barrière) [170].	45
3.9	Un prédateur (centre, violet) adopte un comportement orbite autour de la barrière, dans l'attente que la proie (vert), s'approche [170].	45
3.10	Les créatures virtuelles dans l'environnement 3D physiquement simulé.	46
3.11	Berry, Dorin, Rungsarityotin : gauche, Listening Sky auditeur inculpé par arcs [33]. Droite, Dorin, Carrés d'automne [64]	51
3.12	Dorin : Ménisque. Gauche : Installation interactive. À droite : détail [65]	51
3.13	McCormack : Eden. Gauche : Installation interactive. À droite : détail [140]	51
3.14	À Gauche : Une illustration, section cumulative du score produit par bonification au bout de 60 secondes. À Droite : Niveaux individuels d'habitat.	52
4.1	La voie de chimiotaxie de <i>E. Coli</i>	58
4.2	La représentation graphique du génome utilisé par chaque bactérie.	63
4.3	Le taux de reproduction des bactéries sur 5000 générations	66
4.4	La biomasse de la population de bactéries évoluées au bout de 5000 générations sur 30 exécutions.	67
4.5	Trajectoires en 2D réalisées par quelques bactéries choisies de la simulation.	68
4.6	Captures d'écran de la simulation de bactéries dans l'environnement 2-D.	70
4.7	Le taux de reproduction des bactéries sur 5000 générations sur le modèle de chimiotaxie bactérienne avec un métabolisme avec recyclage.	71
4.8	Le niveau d'énergie de la population de bactéries simulés dans la deuxième expérimentation avec le modèle de métabolisme amélioré.	72

TABLE DES FIGURES

4.9	Le graphe de variation des concentrations des protéines et enzymes utilisés à l'intérieur de la cellule par le processus de chimiotaxie bactérienne. . . .	73
4.10	Le quorum sensing entre bactéries.	76
4.11	Croissance bactérienne sur les 300 premières générations.	78
4.12	Des captures d'écran sur la simulation du QS par échanges de molécules. . .	80
4.13	Des captures d'écran sur la simulation du QS montrant quelques groupes de bactéries exécutant des comportements synchronisés.	81
5.1	Un modèle simple 3-D de la Créature artificielle utilisée dans notre simulation.	86
5.2	La structure du réseau de neurones RNN	88
5.3	La structure du Génome.	90
5.4	Capture d'écran de l'environnement de simulation graphique	92
5.5	Le processus d'évolution pour des comportements de recherche de nourriture réalisés par des créatures artificielles physiquement simulées.	96
5.6	Ces captures d'écran montrent les traces des mouvements de la créature artificielle essayant de s'approprier sa source de nourriture.	97
5.7	Les sorties des effecteurs de la créature artificielle.	98
5.8	Le graphe de vitesse de la meilleure créature et la moyenne de la population de créatures artificielles.	99
5.9	Le flux d'énergie (ou énergie métabolique) de la meilleure créature artificielle et la moyenne de la population de créatures artificielles.	99
5.10	Le graphe de distance de la meilleure créature artificielle et la moyenne de la population de créatures artificielles.	100
5.11	Les chemins réalisés par les meilleurs (lignes rouges) et les pires (lignes vertes) individus de la population à évoluer.	100
5.12	Certaines captures d'écran qui montrent les traces de mouvements des créatures virtuelles dans l'écosystème artificiel.	101
5.13	Le graphe des distances de la meilleure créature artificielle et la moyenne de la population de créatures artificielles.	102
5.14	La simulation du comportement prédateur/proie met en scène deux agents contrôlés par un processus de coévolution par un algorithme génétique. . .	103
5.15	Les paramètres de configuration de l'environnement de simulation.	104
5.16	Le rayon de distance entre le prédateur est la proie.	105
5.17	Quatre captures d'écran de la simulation sur des intervalles de temps différents.	107
5.18	Capture d'écran d'une autre vue montrant les traces de mouvements des créatures artificielles	107
5.19	Le graphe d'évolution des valeurs moyenne de la fitness des prédateurs ainsi que celles des proies au cours des générations.	109
7.1	Le cycle de transfert de l'énergie dans un écosystème.	121

Liste des tableaux

3.1	Synthèse des travaux d'écosystème de calculs.	39
3.2	Une synthèse des travaux d'écosystèmes artificiels.	48
4.1	Les valeurs des paramètres utilisé dans la fonction de métabolisme.	61
4.2	Les paramètres utilisés dans le modèle d'écosystème bactérien.	64
5.1	Les paramètres du corps 3D de la créature simulée.	86
5.2	Les paramètres de l'algorithme génétique utilisé dans ce modèle.	91
5.3	Paramètres physiques utilisés par le moteur dynamique.	93
6.1	Table comparative entre les travaux selon certains critères de simulation . .	113
6.2	Table de synthèse et de comparaison entre des modèles de simulation d'éco- systèmes bactériens.	116

Introduction générale

1.1 Cadre de la thèse

LE domaine de la vie artificielle et celui du développement de comportements de créatures artificielles sont en plein essor depuis plus d'une vingtaine d'années de par qu'ils se soient toujours inspirés de la vie sur terre et des êtres vivants existant dans la vie réelle. Le développement de comportements de créatures artificielles dépend fortement de la nature de l'environnement de simulation, de ses ressources ainsi que des changements qui s'y opèrent. Dans la littérature, plusieurs modèles de développement de créatures artificielles ont été élaborés selon différents niveaux de simulation, que ce soit au niveau cellulaire, au niveau organique voire au niveau population.

Dans les systèmes de la vie artificielle qui développent des comportements de créatures artificielles au niveau population, plusieurs phénomènes peuvent apparaître et émerger à partir de simples modèles individuels de simulation, comme c'est le cas entre autres dans les écosystèmes. Un écosystème est un système complexe décrit par des organismes, un environnement en plus des interrelations physiques, chimiques et biologiques qui les lient dans une zone donnée. L'écologie, en tant que discipline scientifique, porte principalement sur quatre niveaux de la hiérarchie biologique [27] : Organisme, Population, Communauté et Écosystème. Afin de simuler de tels écosystèmes, il est nécessaire de réunir tous ces aspects notamment, les organismes, leurs interactions avec l'environnement ainsi qu'avec les autres organismes de la population à faire évoluer.

Afin de simuler un écosystème avec des organismes artificiels, nous avons utilisé deux approches évolutives, la première étant celle de l'évolution artificielle que nous avons, par ailleurs, utilisée dans notre premier modèle de développement de créatures artificielles, par le biais d'un algorithme génétique traditionnel où une fonction de fitness a été définie d'une façon externe. Quant à la seconde approche, elle relève de la sélection naturelle, celle-ci a été utilisée pour faire émerger des comportements de croissance bactérienne dans un environnement simulé.

Les applications de ce domaine sont diverses et sont fortement liées à la biologie et à la bioinformatique. Les créatures artificielles ainsi générées peuvent également être étendues pour être appliquées dans plusieurs domaines, notamment à celui de la robotique, celui de l'éducation, à l'industrie, dans le domaine des jeux ainsi que celui de la vidéo, etc

1.2 La bio-inspiration

La biologie et les êtres vivants ont toujours été une source d'inspiration pour les humains. De nombreux exemples en sont la preuve. En informatique, les mécanismes inspirés des créatures vivantes sont nombreux dont nous pouvons citer les fameux réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, les algorithmes d'optimisation tels que BFO, PSO, etc. Il existe un autre aspect de bio-inspiration qui puise de la biologie : la bioinformatique. Celle-ci consiste à créer des systèmes informatiques à partir d'une base biologique (*in vitro*, et *in vivo*). On admet aujourd'hui que la démarche qui consiste à s'inspirer de la biologie soit plutôt capitale pour développer les technologies du futur, et ce, en utilisant des techniques du vivant pour concevoir les futurs systèmes de robotique.

Les objectifs de la réalisation de créatures artificielles bio-inspirées sont divers, notons par exemple l'objectif de la compréhension des mécanismes adoptés par le vivant pour concevoir des entités adaptées à un environnement. Nous pouvons également citer la conception de systèmes automatiques ne nécessitant pas l'intervention de programmeurs ou de développeurs pour chaque étape, ce qui peut engendrer aussi un gain majeur dans la création de tels systèmes, pouvant par ailleurs être à la base de conception de nouveaux robots dans un domaine futur d'une technologie très développée. Une des applications de ces créatures peut être la commercialisation de nouveaux jeux vidéos évolutifs, ou l'étude par simulations des expérimentations réalisées en biologie, ou juste une simulation afin de mieux comprendre des organismes complexes avec une méthode simplifiée.

1.3 Problématique

Étudier un écosystème artificiel revient à simuler les comportements de créatures artificielles qui vivent dans cet écosystème, et aussi à étudier les interactions entre ses créatures permettant l'échange de la matière et de l'énergie qui va créer une sorte de chaîne alimentaire.

Ses créatures artificielles peuvent être unicellulaires comme les bactéries qui jouent le rôle de décomposeurs pour les écosystèmes, ou des créatures organiques cherchant de la nourriture (pouvant être des nutriments existants dans l'environnement, ou autres créatures du même environnement).

Certains modèles réalisés ont réussi à développer des systèmes avec des comportements de créatures artificielles dans des écosystèmes artificiels. Dans ce cadre, nous pouvons citer le modèle de Chaumont et al [49] qui ont développé des créatures fourrageurs 3D. Le modèle de Palmer et al [170] et celui de Pilat et al [101] qui ont, à leurs tours, développé des créatures prédatrices et proies simulées dans un environnement physique avec des corps et des morphologies changeantes et devant s'adapter selon les changements de l'environnement. En s'inspirant de ces modèles et des idées communes, chacun de ces chercheurs a pu construire son propre modèle de créatures artificielles avec des comportements contrôlés différemment et des cycles évolutionnaires qui ont donné des résultats différents selon les conditions prédéfinies pour chaque modèle. À titre d'exemple, nous allons considérer notre modèle de créatures fourrageur [167], et notre écosystème bactérien [168]. D'autres modèles utilisent un système comme une plateforme modélisant les créatures artificielles dans leurs écosystèmes et qui jouent comme rôle celui de l'évolution des capacités de survie et de reproduction par le biais de la sélection naturelle tout comme il apparaît dans la nature. Ils ont pu, ainsi, obtenir des résultats de modèles complets très notables

[190, 5, 252, 87, 244, 5, 242].

Ces modèles et bien d'autres nous ont fourni une bonne base d'inspiration afin de mener à bien notre investigation de recherche et nous diriger vers notre but tout en nous alignant avec les recherches les plus significatives et les plus récentes dans le domaine de la vie artificielle et du développement de créatures artificielles.

1.4 Contributions

Une des contributions de cette thèse consiste à simuler un écosystème tout en faisant évoluer des comportements de créatures artificielles qui vivent dans cet écosystème, en échangeant de la matière (comme la matière morte) ou de l'énergie (via un métabolisme) selon les conditions présentes dans l'environnement. Notre choix s'est porté sur les comportements de créatures artificielles qui lient les différentes classes d'un écosystème. Cet écosystème sera représenté par un cycle (ou chaîne) alimentaire où s'opère un échange continu de l'énergie, le but final étant de converger vers un module de construction d'un écosystème artificiel. Dans la figure ci-après 1.1 nous avons modélisé les différentes classes de créatures existantes dans tout écosystème ainsi que l'ensemble de comportements liant chaque classe aux autres classes. Les quatre classes de créatures artificielles présentées dans cet écosystème sont :

- Les plantes virtuelles (qui peuvent être considéré comme créature vivante) ;
- Les créatures de type fourrageurs (ou chercheuses de nourritures) dites créatures herbivores qui se nourrissent des plantes virtuelles ;
- Les créatures prédatrices poursuivant des proies qui, à leur tour s'enfuient de ces dernières, et qui sont dites créatures carnivores (celles qui se nourrissent des herbivores) ;
- Et enfin, les créatures de type décomposeur (les bactéries, à titre d'exemple) qui sont des créatures primordiales dans la construction d'un écosystème artificiel et dans l'étude des différents échanges de la matière.

Une créature de type décomposeur telle que la bactérie est un organisme unicellulaire qui décompose la matière organique comme les animaux morts et les matières végétales. Les décomposeurs sont une partie importante de tout écosystème et possèdent une fonction nécessaire qui contribue à la croissance continue et la survie de l'écosystème. En définitive, ils jouent un rôle important, car ils absorbent la matière organique morte et la décomposent.

La figure ci-après 1.1 présente l'architecture globale de notre écosystème artificiel, cet écosystème est un environnement simulé en 2D et rendu en 3D, il contient des créatures artificielles qui cherchent à survivre, se reproduire, et évoluer dans cet environnement, elles peuvent être classées comme suit :

- Des créatures productrices (les plantes virtuelles), ces créatures ne sont pas développées dans cette thèse,
- Deux types de créatures consommatrices (herbivores et carnivores). Les herbivores [167, 166] sont simulés en tant que créatures 3D contrôlées par un réseau de neurones utilisant une fonction de fitness multi-objective (évaluation) afin de rechercher de la nourriture existante dans l'environnement.
- Les créatures carnivores qui sont des créatures prédatrices cherchant à attraper des proies qui cherchent, à leurs tours à s'enfuir ce qui va conduire le système vers deux comportements opposés avec un seul système d'évolution.

- Par ailleurs, les créatures du type décomposeur que nous avons choisies sont les bactéries [168, 164, 165]. Elles sont modélisées par des équations différentielles leur permettant de se mouvoir à l'aide de leur chimiotaxie et évoluant leurs capacités de reproduction et étendant leur durée de vie. Ces bactéries communiquent ensemble et jouent le rôle de décomposeur de la matière éjectée par les autres créatures du système.

Un même système doit réunir toutes ses créatures malgré la disparité de leurs mouvements, qui sont naturellement liés ensemble. Leurs formes et leurs tailles étant loin les unes des autres, causant avec acuité des problèmes d'homogénéisation de l'échelle de simulation en fonction de la taille et du temps. Cette approche est décrite en détail dans la partie perspective de la thèse.

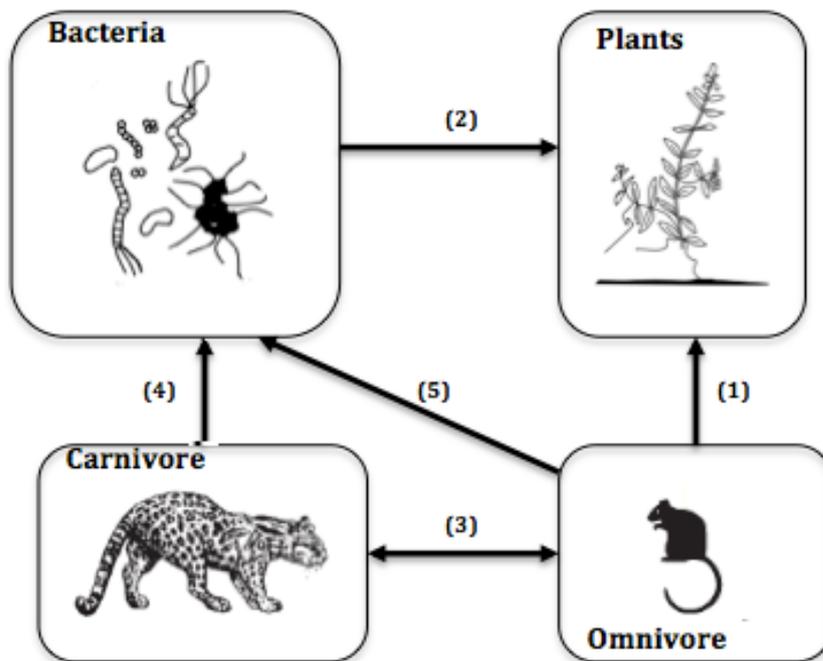


FIGURE 1.1 – Architecture globale de l'écosystème artificiel. (1) Comportement de fourragement ou recherche de nourritures. (2) Nutriments produits par les bactéries. (3) Comportement prédateur/proie. (4 et 5) les déchets rejetés par les créatures.

1.5 Organisation de la thèse

Dans cette section, nous proposons un résumé des différents chapitres composant ce manuscrit tout en précisant les principaux résultats obtenus.

Le second chapitre de cette thèse est dédié à la présentation des définitions détaillées de la vie sous son aspect naturel d'après l'histoire de la vie sur terre ainsi que la vision darwinienne de l'évolution de la vie, de la naissance des premières automates, jusqu'à la naissance de la vie artificielle dans les années 1989. Ensuite, certaines implications philosophiques de la vie artificielle définissant l'émergence, l'évolution, la vie, l'esprit et l'éthique sont passées en revue. Enfin, une synthèse des travaux sur les créatures artificielles est élaborée.

Le troisième chapitre présente un état de l'art sur les travaux relatifs aux créatures

artificielles dans des écosystèmes artificiels. Ces travaux ont été classés en trois catégories, la première concerne les travaux se focalisant sur la chimiotaxie bactérienne et les écosystèmes bactériens en raison de leurs liaisons avec notre premier modèle proposé et qui vont par la suite nous aider dans l'étude comparative. Une deuxième partie sur les principaux écosystèmes de calculs les plus connus et les plus notables, une analyse de ses travaux est aussi fournie. Troisièmement, une classification des écosystèmes les plus récents est présentée, une attention particulière est portée sur les travaux comparables à notre deuxième modèle proposé. À la fin, nous présentons certains modèles d'écosystème dans le domaine de l'art.

Le quatrième chapitre présente notre première proposition, elle introduit le premier type de créatures artificielles dont nous avons développé les comportements dans un écosystème simulé. Ces créatures sont des bactéries *Escherichia coli* qui cherchent à se reproduire, survivre et communiquer entre elles en démarrant d'un modèle qui modélise le mouvement d'une seule cellule et en finissant par l'étude de la dynamique de toute une population.

Le cinquième chapitre concerne la deuxième proposition qui entre aussi dans le cadre du développement de créatures artificielles faisant partie d'un écosystème artificiel. Ce modèle consiste à utiliser une approche qui combine un réseau de neurones artificiel avec un algorithme génétique afin de contrôler le "cerveau" d'une créature artificielle afin qu'elle puisse d'abord se déplacer dans son environnement virtuel. Elle doit également rechercher des sources de nourriture qui sont placées arbitrairement dans un environnement régi par les lois de la physique et de la dynamique.

Le sixième chapitre présente une étude comparative des différents modèles proposés vis-à-vis des modèles existants dans la littérature.

Enfin, le septième chapitre présente la conclusion de ce manuscrit, il met en exergue l'apport de cette thèse, les limites de l'approche élaborée ainsi que les perspectives potentielles.

Vie et Vie Artificielle

2.1 Introduction

LA vie artificielle est un domaine interdisciplinaire de la science, faisant intervenir et coopérer des experts de l'informatique, la biologie, la physique, la chimie et les mathématiques, ainsi que les philosophes et les artistes. La vie artificielle met l'accent sur l'étude des phénomènes de la vie à tous les niveaux de complexité et d'organisation - moléculaire, cellulaire, organique, et la population. Ces études emploient, non seulement des ordinateurs classiques (en utilisant à la fois Software et Hardware), mais également le Wetware, en utilisant des techniques de laboratoire de biochimie. Tout récemment, ils exploitent les techniques récentes de l'impression 3D.

L'avènement de l'ordinateur est un phénomène beaucoup plus récent dans notre histoire, qui marque cependant une étape décisive par ses capacités universelles de simulation. Celles-ci, en effet, permettent d'envisager ce qui autrefois ne relevait que de la pure spéculation. Nous sommes habitués à la vie sur terre. Si habitués, que bien souvent elle nous paraît aller de soi. Le seul exemple que nous connaissons est fondé sur les chaînes carbonées. Néanmoins, il n'est ni évident, ni formellement prouvé que cette forme de vie soit la seule possible. Avec la vie artificielle, on peut en imaginer d'autres formes, fondées sur d'autres substances et dotées de propriétés étonnantes. Elles peuvent être réalisées «matériellement» sous des aspects similaires aux organismes naturels ou aux robots constitués de métaux et de silicium, ou bien encore d'hybrides mélangeant matières organiques et inorganiques. Elles peuvent être également «virtuelles», se présentant sous la forme de structures mathématiques qui évoluent dans un monde abstrait, mais aussi réel pour elles que notre univers l'est pour nous.

Dans cette thèse, nous voulons simuler des créatures artificielles en reproduisant leurs comportements selon la nature de leur environnement qui est un écosystème artificiel. Plusieurs types de créatures artificielles sont simulés, certaines utilisant la sélection naturelle pour se reproduire dans leur environnement alors que d'autres utilisent l'évolution artificielle comme processus leur permettant d'émerger des comportements plus adaptatifs à l'environnement.

Alors que la première partie de ce chapitre s'attelle à définir la vie, nous commençons par relater les origines de la vie sur Terre afin de pouvoir expliquer que la vie artificielle obéit à la même logique que celle de la vie naturelle. Ce chapitre présente un bref historique sur la vie artificielle et illustre les axes de recherche actuels dans le contemporain Soft,

Hard, et Wet de la vie artificielle que cela soit dans le cadre de la simulation de cellules individuelles, des organismes entiers ou des populations en évolution. La vie artificielle informe et génère aussi un certain nombre de questions philosophiques portant sur des concepts tels que l'émergence, l'évolution, la vie, l'esprit et l'éthique de la création de nouvelles formes de vie à partir de zéro.

2.2 La vie sur Terre

2.2.1 Origines de la vie

On ne sait que peu de choses sur les origines de la vie. Néanmoins, la cause première de l'émergence du vivant ne fut pas la simple action du rayonnement ultraviolet sur l'atmosphère primitive. En montrant comment simuler les conditions supposées originelles, Miller a ouvert, dans les années cinquante, la voie à une multitude d'expérimentations prébiotiques. En même temps que les chimistes synthétisaient en laboratoire des acides aminés et des molécules complexes, les astrophysiciens découvraient que l'univers abondait en molécules organiques. Ainsi, en mars 1986, la sonde Giotto détecta un polymère de formaldéhyde (polyoxyméthylène) dans le noyau de la comète de Halley. À la suite de ces expériences, une conclusion semblait s'imposer : la probabilité pour que se forment les « briques de la vie » est beaucoup plus forte qu'on ne l'avait imaginée auparavant.

La thèse la plus répandue postule qu'une grande quantité de molécules organiques ont interagi les unes sur des autres dans une solution tiédie par le flux énergétique émis par le soleil. Les pluies torrentielles auraient entraîné toutes ces substances vers les lacs, lagunes ou mers en formation, pour les y déposer. Ces « bouillons » de matières organiques, riches en sels et en sucres dissous, auraient été propices à l'émergence de la vie. Néanmoins, on ne peut considérer l'émergence du vivant comme le résultat d'une simple réaction chimique. Le problème général de l'origine de la vie implique nécessairement deux aspects : celui de l'apparition spontanée de « proto-organismes » et celui de leur viabilité. D'autre part, il existe deux étapes bien marquées : l'origine de la vie proprement dite, puis la formation des premières structures multicellulaires.

Les travaux d'Eigen et de Schuster [71] ont fourni une description des premières étapes qui auraient conduit à la formation de ces ébauches de la vie. Manfred Eigen a proposé la théorie des hypercycles autoreproducteurs [72]. De nombreux chercheurs ont ensuite étudié des modèles fondés sur les réseaux autocatalytiques, où les nœuds représentent des séquences d'ARN et les arcs les interactions chimiques. Il en est ainsi de Steen Rasmussen avec sa « théorie quantitative des origines de la vie » dans laquelle il montre comment les premières structures génétiques coopérantes auraient pu se former [186].

Dans le cadre d'une caractérisation de ces comportements sur des automates cellulaires à une dimension, Langton a conclu que l'origine de la vie serait associée à l'émergence spontanée d'une dynamique de traitement de l'information à la frontière d'une transition de phase du second ordre.

2.2.2 Définition de la vie

Les définitions de la vie sont nombreuses et varient en fonction du référentiel. Si Langton parle de caractéristiques des systèmes vivants naturels, c'est sans doute qu'il définit la vie comme un ensemble de propriétés. Or il est impossible de faire une liste de

toutes les propriétés du vivant, de façon stricte. Le point de vue thermodynamique évite l'écueil de l'énonciation de caractéristiques finies, mais reste peut-être trop global, alors que Maturana et Varela proposèrent dès 1979, une autre voie de définition.

Il s'agit de concevoir un être vivant comme une organisation autopoétique. 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. Les êtres vivants sont donc caractérisés par leur organisation autopoétique. Ils diffèrent les uns des autres par leur structure, mais ils sont identiques par leur organisation. L'intention de Maturana et Varela, pour définir le vivant, se veut scientifique : « Si nous ne pouvons fournir la liste des caractéristiques d'un être vivant, pourquoi ne pas proposer un système qui génère tous les phénomènes propres aux vivants ? » Le fait qu'une entité autopoétique ait bien toutes ces caractéristiques, apparaît comme une évidence à la lumière de ce que l'on sait sur l'interdépendance entre le métabolisme et la structure cellulaire.

Si nous pouvons définir la vie à l'aide d'une conception métaphysique spéciale, il n'en reste pas moins vrai que les forces mécaniques, physiques et chimiques sont les seuls agents effectifs de l'organisme vivant, et que le physiologiste ne peut avoir à tenir compte que de leur action. Nous dirons avec Descartes : on pense métaphysiquement, mais on vit et on agit physiquement [32]. Autrement dit, pour lui, la vie est un état organisé et homéostatique de la matière. C'est-à-dire qu'un être vivant est un système capable de maintenir la stabilité de sa structure en cas de changement de son environnement. Cette définition implique des mécanismes pour que l'organisme soit capable de maintenir un état optimal dans un environnement dynamique. Ceux-ci vont engendrer des réactions chimiques qui donneront le métabolisme des organismes afin de transformer et d'utiliser l'énergie pour maintenir leur stabilité.

Selon [202], la plus célèbre définition évolutionnaire de la vie est le concept «d'adaptation souple» de M. Bedau [20], [23]. La vie est vue comme le résultat d'une organisation physique complexe apte à réaliser certaines tâches. Une telle définition ne dit rien à propos de cette organisation, elle considère simplement la vie comme un regroupement de propriétés (croissance, autoreproduction ...).

De telles définitions sont communes. Dans le domaine de la vie artificielle, la plus fameuse est celle de Farmer et Belin qui ont sélectionné huit critères ([122], p. 818) :

1. La vie est une structure (pattern) intégrée dans l'espace-temps.
2. L'autoreproduction.
3. Le stockage de l'information associée à l'autoreprésentation.
4. Le métabolisme.
5. Les interactions fonctionnelles avec l'environnement.
6. L'interdépendance des composants.
7. La stabilité face aux perturbations.
8. La capacité à évoluer.

Cette définition est fréquemment utilisée du fait de son efficacité. Il est difficile d'ôter une propriété et généralement il n'est pas nécessaire d'en ajouter de nouvelles.

2.3 Vie artificielle

Langton [122] est à l'origine de cette nouvelle discipline scientifique appelée Vie Artificielle (VA) qui a émergé depuis 1987 avec la première réunion internationale à Los Alamos (USA). Cette ambition trouve son origine dans les progrès de la logique mathématique à partir des années trente qui ont permis la construction théorique, puis pratique, d'une machine universelle : l'ordinateur. Les travaux d'Alan Turing sur la logique formelle l'amènèrent à poser l'ordinateur comme un outil de simulation du réel. Mais il faut la replacer dans son contexte historique et l'étude de ses origines permettra d'en mieux comprendre l'importance. Dès la préhistoire, on peut noter la volonté de représenter, voire de reconstituer artificiellement la vie ou certaines de ses propriétés. Cette volonté se manifestait par exemple par la production de statuettes, mimant les formes et attitudes humaines. Certains pensèrent plus tard à les doter d'articulations afin d'augmenter leurs ressemblances à leurs modèles.

2.3.1 Avènement des automates

L'automatisme intervint avec l'avènement des horloges mécaniques, qui représentaient la pointe de la technique lors du moyen-âge. C'est sur la base du fonctionnement de celles-ci que furent construits les premiers automates, dont certains reproduisaient non sans mal, mais d'une manière réaliste quelques mouvements simples de l'homme ou de l'animal. Dans le même temps, l'avancée de la biologie permettait d'établir des analogies entre le corps humain et des systèmes connus (cœur/pompe, poumons/soufflet,...), plusieurs de ces mécanismes pouvaient alors être "recrétés" artificiellement, de façon grossière, mais stimulante pour les esprits de l'époque. Philosophes, physiciens et mathématiciens y voyaient des objets de curiosité et d'expérimentation. Héron d'Alexandrie (Égypte 125 av J.C.) écrit les pneumatiques et le traité des automates et confectionne des machines simulant les mouvements d'êtres humains ou d'animaux. Byzance voit une ère remarquable d'oiseaux mécaniques et de fontaines animées au IXe et au Xe siècle.

En Asie, les automates utilisèrent la pierre d'aimant qui les orientait toujours vers le sud. En Europe, les Jacquemarts sont apparus au XIIIe siècle ainsi que des horloges astronomiques (Strasbourg). La Renaissance, avec Léonard de Vinci (1452-1519), s'intéressa à la vie artificielle et aux automates androïdes. À l'inverse, Descartes (1596-1650) fit de l'animal une machine et donna une explication mécaniste du fonctionnement du corps humain. Blaise Pascal (1623-1662) construisit, à l'âge de 19 ans, une machine arithmétique reposant sur un système de roues dentées excluant la notion d'erreur de calcul. Leibniz conçut quelques années plus tard une machine capable d'effectuer les quatre opérations élémentaires. Plus tard Charles Babbage (1792-1871) inventa la machine à différences et la machine analytique ancêtre des ordinateurs programmables.

Le Turc mécanique est un canular célèbre datant du XVIIIe siècle, il s'agissait d'un prétendu automate doté de la faculté de jouer aux échecs. Il fut construit et dévoilé pour la première fois en 1769 par Johann Wolfgang Von Kempelen.

Les automates, ces machines réalisées de mains d'homme qui se veulent copies du vivant, ont connu un succès grandissant à partir de XVIIe siècle. Les réalisations les plus impressionnantes datent du XVIIIe avec, en particulier, le Grenoblois Jacques de Vaucanson (1709-1782) et le Suisse Pierre Jaquet-Droz (1721-1790).

Pierre Jaquet-Droz est l'autre figure célèbre du XVIIIe siècle. Là encore, ses auto-

mates imitaient le vivant à la perfection. Le plus célèbre, la musicienne, était capable de jouer différents morceaux sur un orgue. Son aptitude à suivre la partition des yeux, à simuler la respiration ou à saluer le public en a fait l'un des plus beaux automates jamais construits. L'Occident contemporain est notamment influencé par le célèbre roman « Frankenstein » dans lequel un ambitieux étudiant en médecine parvint à assembler un être monstrueux, peu à peu poussé à la solitude et à la haine et qui finit par se retourner contre lui [210].

2.3.2 Vers une discipline scientifique

L'avènement du calcul informatique marqua une nouvelle ère dans l'histoire de la vie artificielle. Contrairement aux automates précédents, la simulation par ordinateur rendait désormais possible l'intégration d'un nombre de phénomènes typiques du vivant tels que la morphogenèse ou la réplication. Parmi les travaux les plus influents, Alan Turing mit en place les bases mathématiques d'une théorie de génération de formes artificielles [239].

Les réflexions de John Von Neumann étaient surtout dédiées à la question suivante : comment une machine pourrait-elle se reproduire et subir des mutations afin de participer à un processus d'évolution ? Il inventa le 'kinematon', un automate cellulaire bidimensionnel capable de construire toute structure dont il possède le plan. Avec le plan de sa propre structure, l'automate se réplique donc à l'identique [249].

Par la suite, des travaux dans un nombre de domaines scientifiques différents ont été effectués en utilisant des concepts qui sont aujourd'hui attribués à la vie artificielle. À titre d'exemple, l'émergence de dynamiques dans les automates cellulaires, et plus particulièrement le fameux jeu de la vie de John Conway [84], où l'adaptation de structures informatiques à l'image de l'évolution naturelle [95] a été étudiée bien avant que cette discipline scientifique ne soit reconnue et organisée.

2.3.3 Naissance de la vie artificielle

La vie artificielle dépasse de loin le seul désir de construire de nouvelles formes de vie. Elle a des implications théoriques dans le domaine de la biologie ou des sciences de la complexité au sens large, mais elle a aussi d'immenses applications concrètes à travers les artefacts biométriques.

Pour Langton, les biologistes sont limités par le fait qu'ils ne connaissent qu'une instance unique de la vie : la vie sur terre à base de carbone. Dans ce contexte, il leur est très difficile d'élaborer des concepts généraux. Comment mettre en évidence des invariants fondamentaux quand on ne connaît un phénomène qu'en un exemplaire unique en ce sens, la vie artificielle pourrait contribuer à la biologie et ceci à plusieurs points de vue :

- La simulation, ou selon les points de vue, la réalisation de nouvelles instances du vivant, c'est-à-dire d'organismes totalement originaux, permettrait de mieux cerner les invariants ou les déterminants fondamentaux de la vie. C'est dans ce contexte que l'on a pu dire que la vie artificielle est à la biologie ce que la physique est à l'astronomie : un cadre fondamental permettant d'appréhender le sujet avec le plus grand recul ;
- D'une manière plus générale, l'élaboration de simulations basées sur une certaine interprétation des mécanismes du vivant, est susceptible de fournir un champ d'expérience, une méthode d'analyse de processus que la biologie « classique » ne peut

cerner du simple fait de contraintes pratiques. Ceci vaut aussi bien pour l'étude de la dynamique des populations, que pour les processus de morphogenèse ou des mécanismes évolutifs. Par exemple, la simulation informatique de colonies d'individus élémentaires et le concept plus général d'intelligence collective apportent beaucoup à la compréhension des sociétés animales, en particulier chez les insectes ;

- Puisque la vie artificielle aborde le problème de la vie d'une manière très générale, il peut en ressortir des concepts globaux, directement tirés des sciences de la complexité, qui pourraient s'appliquer aux phénomènes biologiques.

2.4 Quelques motivations biologiques pour créer des systèmes de vie artificielle

2.4.1 Biologie synthétique

La vie artificielle (VA) est l'entreprise de la compréhension de la biologie en construisant des phénomènes biologiques à partir de composants artificiels, plutôt que de détruire les formes de vie naturelle en leurs éléments constitutifs. C'est la synthèse plutôt que l'approche réductionniste. Nous décrivons ici une approche de synthèse de formes de vie artificielle qui exposent l'évolution naturelle.

La couverture de la vie artificielle est large et couvre trois approches principales à la synthèse : dans le 'hardware' (par exemple, la robotique, les nanotechnologies), dans le 'software' (par exemple, la réplication et l'évolution des programmes sur ordinateur), et le 'wetware' (par exemple, la réplication et l'évolution des molécules organiques, des acides nucléiques, ou autres), (voir section 5 pour plus de détails). Cet essai portera sur la synthèse des logiciels (software), mais il faut espérer que les questions examinées puissent être généralisées à toute synthèse portant sur l'évolution du processus d'évolution.

Thomas S. Ray [196] a suggéré que les synthèses de logiciels (software) dans la vie artificielle doivent être divisées en deux sortes : des simulations et des instanciations du processus de vie. Les simulations de la vie artificielle représentent un progrès dans la modélisation biologique, basée sur une approche «bottom-up», qui a été rendue possible par l'augmentation de la puissance de calcul disponible.

La nouvelle approche «bottom-up» crée une population de structures de données, avec chaque instance de la structure de données correspondant à une seule entité. Ces structures contiennent des variables définissant l'état d'un individu. Des règles sont définies de la façon dont les individus interagissent entre eux et avec l'environnement. Plusieurs très bons exemples de modèles écologiques «bottom-up» ont été publiés dans la littérature de la vie artificielle [94, 228]. Cependant, les écologistes ont également développé cette même approche indépendamment des mouvements de la vie artificielle et l'ont appelé «modèle centré individu» [60, 97].

La seconde approche de la synthèse de logiciel est l'instanciation plutôt que la simulation. Dans la simulation, les structures de données sont créées, celles-ci contiennent des variables qui représentent les états des entités en cours de simulation. Le point important est que dans la simulation, sur l'ordinateur, les données sont considérées comme une représentation de quelque chose de différent, comme une population de moustiques ou d'arbres. Dans l'instanciation, les données de l'ordinateur ne représentent rien d'autre. Les modèles de données dans une instanciation sont considérés comme des formes vivantes dans leur

droit propre et ne sont pas des modèles de n'importe quelle forme de vie naturelle. Ceux-ci peuvent constituer la base d'une biologie comparative [214].

L'objectif d'une instanciation de la vie artificielle est d'introduire la forme naturelle et le processus de la vie dans un milieu artificiel. Il en résulte une forme de vie artificielle dans un autre milieu que le carbone chimique qui n'est pas un modèle des formes de vie organique. L'approche discutée dans cet essai consiste à introduire le processus de l'évolution par sélection naturelle dans le milieu informatique. Il est à considérer que l'évolution est le processus fondamental de la vie et le générateur de forme de la vie [195].

2.4.2 Evolution naturelle dans le milieu artificiel

Jusqu'à nos jours, la vie a été connue comme un état de la matière, en particulier les combinaisons des éléments carbone, hydrogène, oxygène, nitrogène (azote), et de petites quantités de nombreux autres. Cependant, certains travaux dans le domaine de la vie artificielle ont montré que le processus naturel de l'évolution peut intervenir avec une grande efficacité sur d'autres médias, tels que le milieu d'information de l'ordinateur numérique. [4, 57, 110, 189, 190, 193, 192, 199, 196, 225].

Ces nouvelles évolutions naturelles dans les milieux artificiels commencent à explorer les possibilités inhérentes à la « physique et la chimie » de ces médias. Ils ont organisé eux-mêmes et construit des systèmes complexes par autogénération. Bien que ces nouveaux systèmes vivants sont encore si jeunes et qu'ils restent dans leur état primitif, il semble qu'ils se sont engagés dans le même genre de trajet pris par la vie sur terre et sans doute ont le potentiel de faire évoluer les niveaux de complexité qui pourraient conduire à sensibiliser éventuellement des êtres intelligents. Si l'évolution naturelle dans des milieux artificiels conduit à des êtres sensibles et intelligents, ils seront probablement si étrangers jusqu'à ce qu'ils deviennent difficiles à reconnaître. Les propriétés des plantes sensibles sont si radicalement différentes de celles des animaux dont ils sont généralement méconnus ou niés par les humains, et les plantes ne sont que dans un autre royaume d'un grand arbre de la vie organique sur la terre [200, 194, 223]. Les organismes synthétiques évoluant dans d'autres médias, tels que l'ordinateur numérique, ne font pas partie de la même phylogenèse, ni de la même physique. La vie organique est basée sur des matériaux de la physique classique, alors que la vie numérique existe dans un univers logique, et non pas matériel ou informationnel. L'intelligence numérique sera probablement très différente de l'intelligence humaine.

2.4.3 Décès (la mort) artificielle

La mort doit jouer un rôle dans tout système qui reproduit le processus d'évolution. L'évolution implique une itération continue de la sélection, ce qui implique la mort différentielle. Dans la vie naturelle, la mort survient à la suite d'un accident, de la prédation, de la famine, de la maladie, ou, si elles ne réussissent pas à tuer l'organisme, il finira par mourir par l'affaiblissement résultant d'une accumulation de l'usure à tous les niveaux de l'organisme, y compris au niveau moléculaire.

Sur les ordinateurs normaux, les processus « naissent » lorsqu'ils sont déclenchés par l'utilisateur et « meurent » quand ils terminent leur mission et s'arrêtent. Un processus dont le but est de se répliquer de façon répétée est essentiellement une boucle sans fin et ne se terminant pas spontanément. En raison de la perfection des systèmes informatiques

normaux, nous ne pouvons pas compter sur "l'usure", pour provoquer à terme un arrêt du processus.

Dans les systèmes de vie synthétique implémentés sur les ordinateurs, la mort n'est pas susceptible d'être un processus qui se produit spontanément, et elle doit généralement être introduite artificiellement par le concepteur. Toute personne qui a mis en place un tel système a trouvé ses propres solutions uniques. Todd [235] a discuté ce problème en termes généraux.

2.5 Organisation des systèmes de vie artificielle

La vie artificielle contemporaine consiste en l'étude interdisciplinaire de la vie et des processus comme ceux de la vie, etc. Ses deux plus importantes qualités sont celles qui se concentrent sur l'essentiel, plutôt que sur les caractéristiques contingentes des systèmes vivants et celles qui tentent de comprendre les systèmes vivants en synthétisant artificiellement des formes les plus simples d'entre elles. Ces deux qualités sont connectées. En synthétisant des systèmes simples qui sont très semblables à la vie, mais non familiers, la vie artificielle explore de façon constructive les limites de ce qui est possible pour la vie. À l'heure actuelle, la vie artificielle utilise trois différents types de méthodes de synthèse. Le type Soft où la vie artificielle crée des simulations par ordinateur ou d'autres constructions purement numériques qui présentent un comportement comme celui de la vie Hard où la vie artificielle produit des implémentations matérielles des systèmes de la vie, etc. Et enfin Wet pour laquelle la vie artificielle implique la création des systèmes tels que celles de la vie dans un laboratoire en utilisant des matériels biochimiques.

La vie implique des comportements adaptatifs complexes à différents niveaux d'analyse, allant de cellules individuelles vers des organismes entiers, et même vers des écologies en évolution. On peut avoir une idée concrète sur la vie artificielle contemporaine en tenant compte de quelques illustrations Soft, Hard et Wet de la vie artificielle. Ces exemples illustrent l'étendue de la nature interdisciplinaire de la vie artificielle, sa méthodologie de synthèse, et son intérêt de comprendre les propriétés essentielles des systèmes vivants.

2.5.1 Niveau moléculaire

Le niveau moléculaire (Wetware systems) : Les systèmes de la vie artificielle du niveau Wetware sont les plus semblables à la vie réelle et sont en fait issus de la vie naturelle, au moins actuellement. La plupart des expériences sont des tentatives pour diriger un processus évolutif artificiel vers la production de l'acide ribonucléique (ARN) des molécules avec des propriétés catalytiques [16]

2.5.2 Cellules artificielles

Le Saint Graal du "wet" de la vie artificielle est de créer des cellules artificielles de produits biochimiques [25], [187]. De telles cellules artificielles doivent être microscopiques qui s'auto-organisent et s'auto-répliquent d'une façon autonome des entités construites à partir de simples substances organiques et inorganiques [188]. Bien qu'artificielle, pour toutes fins et intentions, elles doivent être en vie, pour qu'elles puissent se maintenir, s'organiser spontanément et s'auto-réparer, et s'adapter de façon ouverte (Open-Ended) aux contingences de l'environnement.

Il existe deux principales motivations derrière cette recherche. La première est purement scientifique. Si l'on pouvait fabriquer des cellules artificielles à partir de zéro, en particulier en utilisant des matériaux ou des méthodes qui ne sont pas employées par la nature, on aurait la preuve spectaculaire des fondements moléculaires possibles des systèmes vivants. Les cellules artificielles ont également un large appel pratique. Les cellules naturelles sont beaucoup plus compliquées que n'importe quelle cellule produite par l'homme [39]. Ainsi, la fabrication de cellules artificielles qui s'organisent et se soutiennent et qui s'adaptent continuellement à leur environnement doit ouvrir la porte aux futures technologies avec des capacités impressionnantes des systèmes vivants.

Qu'est-ce que les cellules artificielles vont-elles faire ? La première fonctionnalité de ces machines sera tout simplement de se déplacer à travers un fluide et un processus chimique. Pour ce faire, ceci implique de manière souple et élastique la résolution des fonctions de base de l'auto-entretien, le contrôle autonome du processus chimique, le contrôle autonome de la mobilité et l'auto-réplication. Les cellules artificielles vont simultanément résoudre ces tâches en intégrant un métabolisme artificiel avec les moyens de la croissance et l'autoreproduction, et la localisation de ces systèmes chimiques en produisant certains conteneurs. Ainsi, des cellules artificielles auront des systèmes biochimiques qui construisent et réparent le conteneur du système (par exemple, les parois cellulaires), les systèmes qui copient les molécules porteuses d'informations qui codent et dirigent des processus cellulaires (gènes), et les systèmes qui font la synthèse des matériaux pour l'auto-assemblage et la régénération cellulaire (métabolisme). Toute vie dans la nature dépend de la coordination de ces trois processus. Les premières cellules artificielles vont nécessairement avoir des versions extrêmement simples.

2.5.3 Agents autonomes

Beaucoup de travaux de la vie artificielle au niveau des organismes multicellulaires ont eu lieu sur le type "Hard" avec la reproduction de formes diverses d'agents ou de robots physiques autonomes. C'est le chevauchement direct de la vie artificielle avec l'intelligence artificielle. La vie artificielle du type 'Hard' tente de synthétiser des comportements autonomes, adaptatifs et intelligents dans le monde réel. Elle contraste avec l'intelligence artificielle traditionnelle et la robotique en exploitant des inspirations biologique autant que possible, et aussi en visant à synthétiser des comportements caractérisant plusieurs organismes plus simples que les humains. Une des astuces consiste à laisser l'environnement physique en grande partie responsable de la génération du comportement. Plutôt que de compter sur une représentation interne élaborée et détaillée de l'environnement extérieur, le comportement de la robotique bio-inspirée dépend directement des entrées sensorielles du système avec son environnement immédiat. Avec les bonnes connexions sensori-motrices, un système peut rapidement et intelligemment naviguer dans des environnements complexes et imprévisibles. Les premiers succès impliqués sont les robots insectes qui ont été étendus vers des robots humanoïdes [8]. Une autre astuce consiste à extraire les matériaux physiques dont le robot est agencé de manière à fournir automatiquement autant de fonctionnalités que possible [178].

Même avec des robots basés comportement, la conception des agents autonomes et intelligents est difficile, car elle consiste à créer les bonnes interconnexions parmi d'autres composants complexes. Les agents intelligents autonomes existant dans la nature sont tous vivants, et leur émergence a été spontanément rendue possible grâce à un processus

évolutif. Ainsi, la vie artificielle utilise l'évolution dans la conception des agents autonomes [52]. À cette fin, les algorithmes génétiques ont été utilisés pour la conception de nombreux aspects liés aux robots, y compris les systèmes de contrôle ainsi que les capteurs (senseurs) [159], [160].

Dans les simulations d'agents autonomes réalistes, le système de contrôle est étroitement couplé avec la morphologie. Sims [213] a montré, il y a vingt ans, la façon de recréer cette interconnexion quand il a simultanément fait co-évoluer les contrôleurs de créatures simulées, des capteurs (senseurs), et la morphologie, mais il comptait sur des supercalculateurs très coûteux. Des progrès plus récents dans le 'hardware' et le 'software' ont permis à cette ligne de recherche d'être poursuivie avec le logiciel (Off-the-Shelf) exécuté sur les ordinateurs portables [229]. Ce travail, comme celui de Sims, implique seulement des simulations. Jordan Pollack et ses étudiants ont franchi l'étape suivante et ont utilisé des méthodes semblables pour développer des robots physiques réels. Ils ont simulé et connecté la co-évolution des contrôleurs avec la morphologie de la technologie Off-the-Shelf du prototypage rapide, permettant à leur conception évolutive d'être automatiquement implémentée dans le monde réel [131], [183]. D'autres citations de quelques travaux de la vie artificielle en 'hard' sont présentés dans le prochain chapitre.

2.5.4 Niveau population

Un autre domaine de recherche principal de la vie artificielle est celui de la modélisation de comportement des écosystèmes et la dynamique évolutionnaire des populations ainsi que la génétique des populations et la dispersion géographique, etc. L'implémentation des systèmes évolutionnaires dans le software est le moyen le plus pratique et le plus constructif pour étudier de nombreuses questions sur les systèmes évolutionnaires, cette approche «soft» ayant été une tendance dominante dans le domaine de la vie artificielle. Une des premières réalisations importantes de l'évolution spontanée sur un support numérique a été Tierra [190], qui est simplement une population, de programmes informatiques auto-répliqués simples qui existent dans la mémoire de l'ordinateur et consomment du temps de calcul CPU. La vie a montré une croissance remarquable de complexité tout au long de l'histoire de l'évolution. La vie procaryote simple unicellulaire conduit à plus de vie eucaryote complexe unicellulaire, ce qui conduit à la vie multicellulaire, puis à des créatures vertébrées de grande taille avec des capacités complexes de traitement sensoriel, et finalement à des créatures très intelligentes qui utilisent la langue et qui développent des technologies sophistiquées - ces créatures sont sur l'axe central de la science cognitive. Bien que certaines formes de la vie sont restées révolutionnairement stables des millions d'années (par exemple, les coelacanthes et les requins), apparemment la croissance (Open-Ended) ouverte à la complexité des organismes les plus complexes est intrigante et énigmatique. Beaucoup d'efforts dans la vie artificielle sont dirigés vers la création d'un système qui montre comment ce genre de progrès évolutionnaire (Open-Ended) est possible, même en principe. De nouveaux progrès dans l'évolution à composition non limitée seraient facilités par des comparaisons quantitatives entre les différents systèmes évolutionnaires naturels et artificiels. Bedau et Packard et leurs collaborateurs ont fait un pas dans cette direction en définissant et étudiant les activités statistiques de l'évolution. La comparaison des données depuis différents systèmes naturels et artificiels suggère qu'il y a qualitativement différentes classes de la dynamique évolutive, et aucun système artificiel ne génère le genre de dynamique évolutive présente dans la biosphère [22]. Nous n'avons

apparemment toujours pas aperçu de critiques sur les mécanismes par lesquels l'évolution crée continuellement de nouveaux types d'environnements qui ne cessent de susciter de nouveaux types d'adaptation.

2.6 Implications philosophiques de la vie artificielle

La science et l'ingénierie de la vie artificielle ont engendré des implications sur un certain nombre de grandes questions philosophiques. Cette section illustre ces implications pour quelques questions philosophiques. Philosophie et vie artificielle sont des partenaires naturels intellectuels, pour trois raisons. En créant de toutes nouvelles sortes de phénomènes de la vie comme la vie artificielle nous oblige continuellement de réexaminer et réévaluer ce qui peut être en vie, adaptatif, intelligent, créatif, etc. En outre, la philosophie et la vie artificielle cherchent à comprendre les phénomènes à un niveau de généralité, qui ignore les éventualités et révèle les natures essentielles. Enfin, la méthodologie de calcul de la vie artificielle est une extension directe et naturelle de la méthode traditionnelle de la philosophie d'une expérience de pensée a priori. Visant à capturer l'essence simple des processus vitaux, la vie artificielle fait abstraction de beaucoup plus de détails que possible sur les systèmes vivants.

2.6.1 Emergence

Une des caractéristiques étonnantes de la vie est la façon dont le tout est plus que la somme des parties. C'est ce qu'on appelle l'émergence [24]. Comme une définition générale, des phénomènes émergents sont des phénomènes macro et micro qui sont liés de sorte que macro est à la fois dépendant et également autonome, tout ça à partir des microphénomènes sous-jacents. Bien que les phénomènes émergents apparents soient tous autour de nous, les deux maîtres mots de l'émergence semblent incohérents ou philosophiquement illégitimes. Comment quelque chose peut être autonome par rapport à la base des phénomènes si cela dépend de ces phénomènes. C'est le problème philosophique traditionnel de l'émergence. Une solution à ce problème serait aussi de dissoudre l'apparition de la métaphysique illégitime et donner naissance à un rôle constructif dans les explications scientifiques des phénomènes macro émergents comme la vie et l'esprit. Le comportement global des systèmes complexes étudiés en vie artificielle offre une nouvelle vision de l'émergence, à un type d'émergence dit "Weak emergence" (ou émergence faible) [19], contrairement à un autre type dit "Strong emergence" (ou émergence forte) qui implique en principe une irréductibilité du macro à partir du micro [117]. Dans cette optique, un système, d'état-macro (macrostate) est émergent juste au cas où il peut être dérivé des conditions des limites du système et de son processus dynamique de niveau micro, mais seulement à travers le processus d'itération et de regroupement potentiel de tous les effets micro. Ce nouveau point de vue explique les deux maîtres mots de l'émergence. Les phénomènes du niveau micro dépendent clairement de phénomènes du niveau macro, pour illustrer cela, on peut penser à la façon dont un modèle de la vie artificielle du type Bottom-up fonctionne en conduisant seulement les microprocessus locaux. Dans la même logique, des phénomènes de niveau macro sont autonomes parce que les interactions de niveau micro dans les modèles Bottom-up produisent de tels effets complexes au niveau macro et que la seule façon de les reconnaître ou de les prévoir consiste à observer le comportement du niveau macro. L'émergence faible est commune dans les systèmes complexes rencontrés

dans la nature, et les modèles de la vie artificielle l'exposent également. Ceci montre la façon dont la vie artificielle pourrait jouer un rôle actif dans les futurs débats philosophiques sur l'émergence, ainsi que des notions connexes comme l'explication, la réduction et la hiérarchie. Les systèmes vivants sont un exemple type de phénomènes émergents, et les modèles Bottom-up de la vie artificielle génèrent des phénomènes impressionnants au niveau macro exclusivement sur les interactions de niveau micro.

2.6.2 Evolution

Comme indiqué plus haut, l'évolution de la vie a engendré une remarquable croissance en complexité. Une simple vie procaryote unicellulaire mène à une vie eucaryote unicellulaire plus complexe, ce qui mène ensuite à la vie multicellulaire, puis à des créatures de vertébrés de grandes tailles avec des capacités de traitement sensoriel sophistiqué, et finalement, à des créatures très intelligentes qui utilisent des langages et qui développent une technologie sophistiquée. Ceci soulève une question de fond sur le potentiel créatif de l'évolution : est-ce que l'évolution possède une tendance inhérente à créer une plus grande complexité adaptative, ou est-ce que la croissance de la complexité de la vie est tout simplement un sous-produit contingent et accidentel de l'évolution ? Cette question a attiré l'attention des philosophes et des biologistes. Stephen Jay Gould [85] a imaginé une façon intelligente pour résoudre ce problème : l'expérience de la pensée pour rejouer la bande de la vie. Imaginez que le processus de l'évolution a été enregistré sur une bande magnétique. L'expérience de la pensée consiste à rembobiner le processus évolutif en arrière dans le temps, en l'effaçant de la bande, et puis de rejouer vers l'avant à nouveau, mais en lui permettant d'être entièrement façonnée par différentes éventualités. On ne sait pas quel sera le résultat de l'expérience de la pensée. Gould lui-même suggère que « toute rediffusion de la bande conduirait l'évolution sur un sentier radicalement différent de la route effectivement prise. » Il conclut que la contingence de l'évolution détruit toute possibilité de croissance nécessaire à la complexité adaptative ». Daniel Dennett [61] tire une conclusion exactement inverse. Il fait valoir que les fonctions complexes, comme le traitement sensoriel sophistiqué, offrent un tel avantage adaptatif distinct que la sélection naturelle va inévitablement le découvrir sous une forme ou une autre. Dennett conclut que rejouer la bande va presque inévitablement produire des créatures très intelligentes qui utilisent des langages et qui développent une technologie sophistiquée. L'évaluation finale des hypothèses telles que celles de Gould et Dennett sur la créativité inhérente à l'évolution doit atteindre des progrès dans la vie artificielle en réponse à l'effet de rejouer la bande de la vie.

2.6.3 La vie

La vie semble être l'une des catégories les plus élémentaires des phénomènes naturels réels. Pourtant, il est certainement difficile de dire ce qu'est exactement la vie. Le fait est qu'aujourd'hui, nous ne connaissons aucun ensemble de conditions individuellement nécessaires et non conjointement suffisantes pour la vie. Néanmoins, il existe un large consensus sur les caractéristiques distinctives que la vie partage. Ces caractéristiques comprennent une organisation adaptative complexe soutenue par des processus métaboliques produits par la sélection naturelle à travers un processus impliquant une variation aléatoire de la contingence historique, et produisent des phénomènes qualitatifs et imprévisibles impli-

quant des individus uniques et variables contenant des macromolécules uniques [137]. La caractéristique de coexistence de ces caractéristiques est frappante, et c'est une raison pour soupçonner qu'il y a une explication unifiée de la vie. Mais les apparences peuvent être trompeuses : les phénomènes vitaux pourraient n'avoir aucune explication unifiée et la vie peut ne pas être une catégorie de base des phénomènes naturels. Les sceptiques, comme [215] Sober, pensent que la question de la nature de la vie, en général, n'a pas de réponse intéressante. Mais il ne faut pas reculer devant le scepticisme, seulement en dernier recours. Ceux qui recherchent une vie extraterrestre, ceux qui cherchent l'origine de la vie sur Terre, et ceux qui tentent de synthétiser la vie dans des milieux généralement artificiels parient qu'il y a une explication intéressante de la vie en général.

Depuis Aristote à Kant, les philosophes ont étudié la nature de la vie, mais ceux d'aujourd'hui ignorent cette question peut-être parce qu'elle semble trop scientifique. Dans le même temps, la plupart des biologistes ignorent également cette question, peut-être parce qu'elle semble très philosophique. L'avènement de la vie artificielle a surtout revitalisé la question aujourd'hui. On ne peut simuler ou synthétiser des systèmes vivants que si on a une idée de ce qu'est la vie. Mais, la vie artificielle vise à discerner l'essence de la vie tout en encourageant l'expérimentation libérale avec la nouvelle vie comme organisation et processus. Ainsi, la vie artificielle favorise une large perspective sur la vie. En dernière analyse, la question de la nature de la vie est évaluée par quelques perspectives qui fournissent la meilleure explication des caractéristiques qui présentent les systèmes vivants. Comme expliquer ses phénomènes aiderait également à résoudre une grappe d'énigmes sur la vie, mieux comprendre comment la notion de la vie s'applique à différents niveaux dans la hiérarchie biologique et la relation entre l'incarnation matérielle de la vie et les processus dynamiques dans lesquels ces matériaux participent [23]. De plus, la vie artificielle fournit un cadre constructif permettant d'explorer les implications des différentes conceptions de la vie.

La vie artificielle a donné une attention particulière à la question de savoir si les systèmes purement numériques existants dans les ordinateurs ne pourraient jamais être littéralement en vie. Il serait plus facile à répondre à cette question une fois qu'il y a accord sur la nature de la vie, mais cet accord ne doit pas être attendu jusqu'à ce que nous ayons exploré toute une gamme beaucoup plus large de possibilités. Ainsi, le débat sur l'opportunité de la vie réelle, mais également artificielle est non seulement possible mais également perpétuel. Certaines personnes se plaignent que c'est une catégorie simple faute de confondre une simulation informatique de la vie avec un exemple réel de celle-ci [173]. Une simulation de vol pour un avion, quelque soient son niveau de détail et son réalisme, ne signifie pas qu'il y'a au un vol réel. Une simulation d'un ouragan ne crée pas de vraies pluies entraînée par de vrais coups de vent. De même, une simulation informatique d'un système vivant produit seulement une représentation symbolique du système vivant. Le statut ontologique intrinsèque de cette représentation symbolique n'est rien de plus que certains états électroniques à l'intérieur de l'ordinateur (par exemple des modèles de hautes et basses tensions). Cette constellation d'états électroniques est n'est pas plus vivante d'autant plus que c'est une série de phrases en anglais décrivant un organisme. Un système ne semble vivant que lorsqu'il il ait donné une interprétation appropriée. Mais cette occasion d'erreur de catégorie peut être atténuée. Les systèmes de la vie artificielle ne sont généralement pas des simulations ou des modèles de tout système vivant familier, mais de Nouveaux Mondes numériques. Le Jeu de la vie de Conway, par exemple, n'est pas une simulation ou un modèle de n'importe quel système biochimique réel, mais un univers

numérique qui représente l'auto-organisation spontanée macroscopique. Ainsi, lorsque le jeu de la vie est réellement en cours d'exécution sur un ordinateur, le monde contient une nouvelle instance physique d'auto-organisation. Les processus tels que l'auto-organisation et l'évolution sont potentiellement réalisables et peuvent être incorporées dans une grande variété de médias différents, y compris le support physique des ordinateurs opportunément programmés. Ainsi, dans la mesure où les propriétés essentielles des systèmes vivants répondent à des mécanismes comme l'auto-organisation et l'évolution, des ordinateurs opportunément programmés représenteraient effectivement de nouvelles réalisations de la vie.

2.6.4 L'esprit

Toutes les formes de la vie ont des capacités mentales [62]. Ils sont sensibles à l'environnement de diverses façons, et cette sensibilité environnementale affecte leur comportement de diverses manières. En outre, la sophistication de ces capacités mentales semble correspondre à la complexité de ces formes de la vie. Il est donc naturel de se demander s'il y a un lien intéressant entre la vie et l'esprit. Étant donné que toutes les formes de la vie doivent faire face d'une manière ou d'une autre à un monde complexe, dynamique et imprévisible, cette souplesse intrinsèquement adaptative relie peut-être la vie et l'esprit. Comprendre la façon dont la vie et l'esprit sont connectés est l'une des énigmes fondamentales de la vie.

De nombreuses capacités mentales sont certainement des adaptations produites par le processus de l'évolution des organismes vivants. Cela suffit pour une certaine connexion peu profonde entre la vie et l'esprit. La vision d'Aristote, relatant le fait qu'il y ait une unité conceptuelle intrinsèque de la vie et l'esprit est beaucoup plus profonde. Pour Aristote, l'activité mentale de l'organisme consiste en l'exercice de diverses capacités internes et potentielles (liées à l'âme), et être en vie consiste en l'exercice de ces mêmes capacités et ces potentialités [55]. La théorie de la vie comme évolution créatrice continue implique une vue connexe selon laquelle l'esprit peut être vu comme une expression d'un processus qui est également le dispositif définitif de la vie. Pour avancer cet argument, on doit faire appel à la souplesse de la vie et de l'esprit [18].

2.6.5 Éthiques

Les deux processus qui catalysent la recherche dans le domaine de la vie artificielle et les produits scientifiques et pratiques liés à cette axe de recherche soulèvent des questions d'éthiques relativement complexes [25]. Ces questions incluent quatre grandes catégories : (i) le caractère sacré de la biosphère (ii) le caractère sacré de la vie humaine (iii) le traitement responsable des nouvelles formes de la vie et (iv) les risques de l'utilisation de technologies liées au domaine de la vie artificielle.

Les questions d'éthique de la vie artificielle ressemblent un peu à celles concernant les expérimentations sur les animaux. En outre, le génie génétique, l'intelligence artificielle et l'abondante littérature sur ces sujets peuvent guider l'exploration des questions éthiques dans la vie artificielle. En revanche, créer de nouvelles formes de vie et interagir avec elles d'une façon nouvelle nous place dans un terrain éthique peu exploré.

2.7 Les applications de la vie artificielle

La vie artificielle est exploitée pour la création de la vie synthétique sur ordinateur afin d'étudier, de simuler et de comprendre les systèmes vivants. La définition et les caractéristiques de la vie artificielle sont représentées par les applications de ses études. Les domaines d'application de la vie artificielle traités comprennent le contrôle, la fabrication de robots, l'infographie, la modélisation de phénomènes naturels, les divertissements, les jeux, la musique (art), l'économie, Internet, le traitement de l'information, le design industriel, les logiciels de simulation, l'électronique, la sécurité, l'exploration de données et les télécommunications. Les domaines qui utilisent le plus la vie artificielle sont la robotique, l'infographie ainsi que l'ingénierie. Les recherches en synthèse d'images explorent une nouvelle frontière depuis l'apparition de la vie artificielle. Un monde d'objets beaucoup plus complexes que ceux généralement accessibles par l'intermédiaire de la modélisation géométrique et physique séparées, ses objets sont ceux qui sont "en vie". La modélisation et la simulation des systèmes vivants pour l'infographie résonnent avec un domaine émergent de la recherche scientifique, la vie artificielle, une discipline qui transcende les frontières traditionnelles de l'informatique et des sciences biologiques [34]. La synergie entre l'infographie et la vie artificielle définit maintenant le bord d'attaque des graphiques avancés de modélisation. Des concepts de la vie artificielle jouent un rôle central dans la construction des modèles graphiques avancés pour l'image de synthèse, l'animation, le multimédia et la réalité virtuelle.

En règle générale, ces modèles prennent des formes complexes et vivent dans des mondes virtuels dans lesquels ils sont soumis aux lois de la physique. Considérés comme valables, ils intègrent souvent la pointe géométrique et technique de la modélisation basée sur la physique. Cependant, d'une manière plus significative, ces modèles doivent également simuler un nombre de processus naturels qui caractérisent uniquement les systèmes vivants y compris la naissance et la mort, la croissance et développement, la sélection naturelle, l'évolution, la perception, la locomotion, la manipulation, le comportement adaptatif, l'apprentissage et l'intelligence. La vie artificielle appliquée à l'infographie a donné naissance à plusieurs des principales voies de recherche et de développement. L'approche de la vie artificielle s'est avérée particulièrement efficace pour l'animation avancée. Il existe maintenant des techniques pour la modélisation réaliste et l'animation des plantes, des animaux et des humains. Le modèle comportemental est une tendance majeure dans l'industrie des effets spéciaux cinématographiques. L'augmentation incessante de la puissance de calcul tire l'attention des chercheurs et des praticiens à caractères synthétiques pour les jeux interactifs. En outre, l'évolution artificielle est acceptée officiellement comme une technique puissante pour l'image de synthèse et, éventuellement, pour la synthèse de modèles.

2.8 Les créatures artificielles

Un grand nombre de simulations sur ordinateur ont été réalisées pour étudier l'évolution de comportements de créatures artificielles tout en prenant en compte l'environnement de simulation ainsi que la nature et la morphologie des créatures artificielles. Il faut noter que l'environnement influence grandement sur l'acquisition du comportement des créatures artificielles. Le mouvement joue un rôle crucial dans le sort de la plupart des organismes biologiques et est le thème de la recherche le plus actif et le plus diversifié dans

le domaine de la biologie [96]. Les morphologies limitent le mouvement des organismes en leur permettant de trouver de la nourriture, d'échapper à la prédation et de se reproduire. Ainsi, ils sont d'une importance cruciale pour la survie de l'organisme. Certains modèles utilisent le mouvement de natation tel que celui réalisé par Terzopoulos et al. [231] qui a réalisé un comportement d'un poisson artificiel dont le contrôleur apprend la natation dans un environnement virtuel représentant l'eau. Usami [240] a réalisé une simulation du mouvement de natation sur le modèle *Anomalocaris* dans un environnement virtuel de l'eau en deux dimensions en ce utilisant la méthode des particules. Iwadate et al [103] ont visé l'évolution des créatures virtuelles autonomes qui ont des formes complexes dans un environnement complexe. Ils ont fait évoluer des créatures artificielles dans des environnements pluriels (sur un terrain, dans l'eau, ...). Ils ont, ainsi, proposé une méthode de simulation pour la natation de créatures artificielles qui tient compte de la flottabilité et le drag d'eau comme un environnement d'eau virtuelle. Le modèle à Blocks de Sims [213] est un modèle standard de l'évolution de créatures virtuelles combinant un phénotype simple avec un puissant codage génératif. Sims [213, 212] a montré que la créature virtuelle est capable d'acquérir sa morphologie et le comportement simultanément par une méthodologie évolutive basée sur la concurrence de la créature. Depuis son travail, plusieurs recherches ont utilisé des simulations physiques des créatures virtuelles pour l'évolution de la locomotion [181], la poursuite de lumière [182], l'évolution de catapultes virtuelles [50], la co-évolution pour des tâches de capture d'une boîte [151], et la co-évolution de créatures virtuelles luttant les unes contre les autres [149]. La locomotion sur le terrain exécutés par des robots d'une forme d'un serpent [226]. Des comportements de prédateurs-proies obtenue à l'aide d'un modèle de vision [170]. Le modèle « L-Brain » pour le contrôle d'une araignée virtuelle [169]. La capacité de trouver des ressources de nourriture est commune, même parmi les organismes les plus simples. Même les organismes unicellulaires, comme les bactéries, sont capables de détecter la concentration de diverses substances chimiques (qui peuvent servir de nourriture) dans les milieux liquides, et de passer à un endroit où la concentration est plus élevée. Ce phénomène est appelé chimiotaxie, et est un exemple de comportement cognitif minimal [26]. La recherche de nourriture est essentielle à la survie de nombreuses espèces animales, elle implique une variété de comportements allant de la chimiotaxie de base dans les bactéries [224] jusqu'à élaboration de comportements coopératifs, par exemple dans la chasse de groupe utilisée par les prédateurs. Cette interaction de recherche de nourriture est à l'origine d'une variété de phénomènes fondamentaux tels que la co-évolution mutuelle de recherche de nourritures [174, 155], la course aux armements pour la co-évolution des prédateurs-proies [2, 236], ou l'émergence de comportements migratoires, nomades, sédentaires et [63, 156]. La recherche de nourriture peut également donner des indications importantes sur la stabilité des écosystèmes et la dynamique de la chaîne alimentaire [17, 233]. Un domaine où la recherche de nourriture occupe une place importante est la simulation d'environnements en trois dimensions, physiquement réalistes. Ces environnements constituent prototypes idéaux qui fournissent un réalisme suffisant pour tester différents concepts en robotique [243, 51]. Le chemin de l'évolution de la recherche de nourriture dans les organismes virtuels 3D à pattes est éclairé par plusieurs balises, telles que l'évolution de la locomotion en avant [213, 119, 150, 124, 50, 13], la compétition pour une seule source alimentaire [34], l'évolution de la poursuite de la lumière [213, 182] ainsi que l'évolution de créatures volante se dirigeant vers des buts [162]. L'évolution des comportements durables de recherche de nourriture par des créatures virtuelles physiques, où à la fois la morphologie et le contrô-

leur sont sous le contrôle de l'évolution, n'a pas été suffisamment étudiée. Chaumont et al [49] a fourni l'un des premiers exemples de l'évolution de la recherche de nourriture soutenue pour des créatures tridimensionnelles à pattes physiquement simulées à travers un système expérimental complexe avec plusieurs stades d'évolution. A titre d'exemple, et contrairement à d'autres approches, Pilat et al [180] ont fait évoluer des créatures par une seule étape de l'évolution des expériences dans des environnements composés de plusieurs objets alimentaires distribués uniformément. Les créatures réussissent à faire évoluer leur capacité de recherche de nourriture durable qui résiste aux changements par rapport à la distribution des objets alimentaires. Les interactions prédateurs-proies ont longtemps été pensées pour favoriser l'évolution adaptative dans les systèmes artificiels [120, 213]. Une "course de la Reine Rouge" entre le prédateur et la proie peut créer une course à l'armement de l'adaptation entre eux. Un principe de travail élaboré par Nolfi et al. [81, 158] ainsi que les travaux connexes de Buason et al. [43, 42] ont exploré la coévolution des prédateurs et des proies, en utilisant une version simulée d'un robot. Cliff et al [53] ont réalisé des simulations de la co-évolution des stratégies de poursuite et d'évasion. Palmer et al [170] ont développé des pistes évolutives avec deux espèces d'araignées qui interagissent par simulation l'une avec l'autre et avec des objets inanimés jouant le rôle de barrière. Une espèce (le *prdateur*) est sélectivement récompensée pour "manger" (en entrant en collision physiquement) les autres espèces, et l'autre (la *proie*) est sélectivement pénalisée pour avoir été prise, et récompensée pour "manger" les obstacles. Erdie et al [78], ont étudié l'émergence d'un tel comportement chez les animaux artificiels (Animats) dans un environnement liquide simulé en 2 dimensions. Ces "prédateurs" sont contrôlés par l'évolution des réseaux de régulation génétique artificiels codés dans les génomes linéaires. Le sort des prédateurs est déterminé uniquement par leur capacité à recueillir de la nourriture et se reproduire. La dynamique de la population peut être introduite directement dans un de ces types de modèles. En effet, la dynamique de la population dépend de l'appétit des individus et de la fonction de fitness, et ça représente le nombre de descendants dans les modèles, bien que presque tous les modèles précédents de créatures virtuelles ont un nombre fixe d'individus. Si En disposant d'une puissance de calcul suffisante, nous pouvons observer et analyser l'interaction entre la dynamique démographique et la dynamique évolutive dans des environnements virtuels 3D. Le processus évolutif peut affecter la dynamique écologique aux niveaux intra-espèces et inter-espèces. Pilat et al [102] ont présenté une étude qui se concentre sur les interactions prédateurs-proies comme élément clé des systèmes écologiques [126]. Les pressions de prédation dans les chaînes alimentaires façonnent la diversité et les fonctions des organismes [11]. Les prédateurs emploient diverses stratégies de capture de leurs proies, et en même temps, les proies emploient divers mécanismes de protection contre leurs prédateurs dans la nature [70], qui peuvent être considérés comme des résultats de la co-évolution entre les prédateurs et les proies.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini en le concept de la vie, la vision darwinienne de l'évolution de la vie, de la naissance des premiers automates jusqu'à la naissance de la vie artificielle dans les années 1989. Ensuite, nous avons présenté certaines implications philosophiques de la vie artificielle définissant : l'émergence, l'évolution, la vie, l'esprit et l'éthique. Enfin, une synthèse des travaux sur les créatures artificielles adoptant les techniques et les aspects définis plus haut.

Les écosystèmes Artificiels

3.1 Introduction

UN certain nombre de modèles de la vie artificielle ont exploité le concept d'écosystème abstrait ou simplifié. Le concept d'écosystème artificiel a été introduit dans les années 70 par Conrad [56]. Une population d'agents software indépendants interagit grâce à la physique et la chimie artificielle spécifiquement programmées. L'interaction d'un agent est simplement analogue à celle qui se produit dans un véritable écosystème. Les agents doivent obtenir des ressources suffisantes de leur environnement pour survivre et se reproduire. En règle générale, un certain nombre d'agents réussissent à faire émerger des stratégies de survie (niches), et ce, souvent avec des interdépendances entre les différentes espèces (par exemple de symbiose et parasitisme). Des méthodes similaires d'écosystèmes artificiels ont été utiles dans les problèmes de modélisation en économie [12], en écologie [153] et en sciences sociales [76]. La majorité de ces systèmes se concentrent sur une seule niche, des milieux homogènes, et fonctionnent à des échelles de temps de l'évolution, en simulant l'évolution pour une population d'une seule espèce. Cette mise au point et l'utilisation de grandes hypothèses minimales sont principalement pour des fins de vérification et de validation de l'évolution des modèles de la vie artificielle [3]. Les agents de la vie artificielle adaptent leurs comportements à travers un processus évolutif pour mieux s'adapter à leur environnement (généralement homogène).

Dans ce chapitre, comme décrit plus haut, nous allons aborder les écosystèmes artificiels et analyser une grande variété des travaux en rapport avec la vie artificielle qui se sont focalisés sur ce domaine qui est encore très lié à la biologie tout autant que sur celui de vie artificielle.

3.2 Ecosystème Naturels

Un écosystème est un système complexe décrit par des organismes, un environnement, et leurs interrelations physiques, chimiques et biologiques dans une zone donnée. L'écologie en tant que discipline scientifique porte principalement sur quatre niveaux de la hiérarchie biologique [27] :

- Organisme : Comment les organismes individuels affectent et sont affectés par leur environnement.
- Population : La présence ou l'absence de certaines espèces, leur nombre et les tendances et les fluctuations de ces chiffres.
- Communauté : La composition et l'organisation des populations d'espèces.
- Écosystème : La communauté avec son environnement physique, y compris les voies de l'énergie et de la matière qui se déplacent entre les éléments biotiques et abiotiques du système. Un écosystème est une source et un puit pour l'énergie et la matière.

La métaphore d'un écosystème en évolution a été choisie pour cette approche de l'évolution de l'agent artificiel puisque la dynamique de l'évolution résulte de la modélisation des agents individu et de leurs relations dans les conditions et les ressources, en combinaison avec la diversité de leurs interactions avec d'autres agents dans leur environnement. Ensemble, ces facteurs constituent l'écosystème artificiel. Ce point de vue d'un système évolutif, où la sélection naturelle est une propriété du système émergent, est en contraste avec les algorithmes évolutionnaires traditionnels où l'évolution est la conséquence directe d'un processus de sélection algorithmique explicite [179].

3.3 Les Écosystèmes artificiels

3.3.1 Considérations de design pour un écosystème informatique

Continuellement formée par la sélection naturelle, la vie sur terre a persisté pendant près de 4 milliards d'années [134]. À l'échelle de l'adaptation, elle a eu à persister pendant si longtemps, pour accueillir à jamais l'évolution des environnements et coloniser la plus grande partie de la planète. Elle est cependant difficile à apprécier dans son intégralité. La robustesse de ce principe est certainement bien au-delà de tout ce que l'homme peut concevoir.

Il semble logique, alors, que nous essayions, non seulement de comprendre exactement comment l'évolution fonctionne, mais que l'on chercherait à adopter ses mécanismes et les utiliser à nos propres fins. Constatant la grande variété et la complexité des êtres vivants complexes sur notre planète, le concepteur, qui veut capturer les aspects du processus qui a mené ces entités vers l'existence, est confronté à deux inconvénients majeurs. Contrairement à la nature, il ne peut pas bénéficier directement du moteur physique massif en temps réel que nous appelons l'univers, et il n'est pas susceptible de disposer du même intervalle de temps pour cette entreprise tel que l'univers lui-même avait pour la création de la vie comme nous la connaissons aujourd'hui.

Aussi évidentes que ces deux contraintes puissent l'être, il semblerait approprié de les amener à l'esprit au début de cette section, dès qu'elles ont des implications majeures pour chaque étape de la conception d'un modèle de l'évolution artificielle. Il est important, dès le début de reconnaître la réalité quelque peu intimidante : à l'égard de ces deux aspects, la différence d'échelle de la coopération entre l'univers et le créateur n'est pas banale,

mais elle est plutôt stupéfiante.

3.3.2 Écosystèmes artificiels bactériens

Un écosystème est un système complexe décrit par des organismes, un environnement ainsi que les interactions existantes entre les deux. Parmi ces écosystèmes, nous pouvons citer l'écosystème bactérien. Dans ce qui suit, nous allons présenter un classement des travaux sur les écosystèmes artificiels bactériens en prenant en considération les critères décrits ci-après. Les bactéries sont des organismes unicellulaires qui ne disposent pas d'un système nerveux. Elles sont attirées et repoussées par certains stimuli, comme c'est le cas, par exemple de la lumière (phototaxie) ou des substances chimiques dans leur environnement (chimiotaxie). Elles se déplacent dans leur environnement, en acceptant et diffusant des substances par diffusion tout en essayant détecter les endroits contenant les bonnes substances. Qu'est-ce qui leur permet d'atteindre ce comportement adaptatif ?

Lorsque nous observons cette bactérie dans son environnement, le comportement qu'elle développe est appelé chimiotaxie. La bactérie *Escherichia coli* est sensible aux chimio attractants, qui sont repoussés par des flagelles. Elle est capable de nager en douceur 'run' ou rapidement vers un gradient de concentration d'une attraction. Quand elle trouve une concentration uniforme, elle passe vers le comportement de 'tumbling'. [184].

Comment ce comportement observé peut-il émerger depuis la dynamique de sa structure en interaction avec l'environnement ? Il existe des surfaces sensorielles (réceptrices) et motrices (principalement des flagelles) dans la bactérie reliées par une voie de signalisation, qui constitue un système dynamique complexe. Les éléments de base interagissent principalement par l'intermédiaire d'un transfert de groupes de phosphoryle. Ceux-ci sont produits dans la cellule et sont présents au niveau des appuis des flagelles. La production de phosphoryle est inhibée, en encourageant la natation en 'run' (rapide et direct). À partir de ceci, le comportement de base émerge. Cependant, la dynamique est plus compliquée. Tout d'abord, il y a également des groupes méthyle qui agissent comme des boucles de rétroaction, produisant un effet homéostatique de sorte que la fréquence du 'tumble' et la natation reviennent à un niveau de base, quelque soient les concentrations des attractants. De plus, il y'a également le regroupement des récepteurs impliqués (voir [184]). Tous ces processus sont impliqués dans la perturbation mutuelle des bactéries et de l'environnement, donnant lieu aux comportements observés. Ainsi, la chimiotaxie joue un rôle important dans la vie bactérienne, fournissant des bactéries avec la possibilité de rechercher rapidement un environnement de croissance optimal.

Bien que les bactéries soient des organismes unicellulaires, elles ont la capacité d'agir de concert par la synthèse et la détection de petites molécules diffusantes auto-inductrices. Ce phénomène, connu sous le nom de quorum sensing, a surtout été proposé pour servir de moyen pour la mesure de la densité cellulaire. Ci-après une organisation des travaux dans le domaine de la vie artificielle qui se concentrent sur l'étude des comportements bactériens, ces travaux sont classés selon les critères ci-dessous.

3.3.2.1 Problème étudié

Plusieurs modèles ont tenté de simuler des écosystèmes bactériens à partir d'études de comportements individuels des bactéries en exploitant la chimiotaxie par des méthodes différentes, telles que :

Le modèle BacSim [121] qui est un modèle basé individu, a été développé pour simuler la croissance et le comportement des bactéries. Le potentiel de l'approche associée à ce modèle consiste à relier les propriétés des entités microscopiques - cellules - aux propriétés des systèmes complexes macroscopiques tels que les biofilms.

Le modèle Rubam [247] présente une approche de modélisation écologique/évolutive qui est inspirée des écosystèmes bactériens naturels ainsi que de l'évolution des bactéries. Le système Rubam est un modèle d'écosystème artificiel basé individus qui a été conçu pour explorer la capacité d'évolution des stratégies comportementales d'adaptation des bactéries artificielles représentées par des systèmes de classeurs d'apprentissage à base de règles.

Le modèle RapidCell [248] qui est un modèle hybride de simulation de la chimiotaxie de la bactérie *Escherichia coli* permet d'étudier la façon dont les réponses au niveau de la population peuvent émerger à partir des propriétés de signalisation et des mécaniques des cellules individuelles. Dans ce modèle, on a étudié deux variantes de signalisations au sein de populations bactériennes homogènes (homotypique) ainsi que la signalisation et de la concurrence au sein des populations hétérotypiques mixtes. Ainsi, on a particulièrement étudié les façons avec lesquelles la taille de la population, la densité cellulaire locale, et le confinement spatial affectent la croissance de la colonie et comment des stratégies facilitant la détection de quorum sont élaborées.

Dans [177], les auteurs ont proposé un modèle de simulation et de modélisation in-silico pour l'étude des voies de transduction du signal [171]. Une voie de transduction de signal (STP) décrit les protéines, les sites d'ADN régulateurs (les opérons) et d'autres molécules impliquées dans une série de réactions chimiques intracellulaires, qui ont comme effet l'émergence d'une action physique de la cellule. La première STP présentée dans ce travail, modélise le métabolisme et la chimiotaxie dans la bactérie *E. Coli*. Grâce à la chimiotaxie, les bactéries sont mobilisées dans leur environnement et peuvent rechercher des éléments nutritifs et éviter le stress.

3.3.2.2 Spécificités

Chaque modèle est conçu pour une fin spécifique différente de celles des autres. Cependant, tous les modèles convergent vers le même but global qui est la simulation de bactéries par la chimiotaxie afin de construire et d'étudier des écosystèmes artificiels.

Prenons, par exemple, le modèle BacSim [121], où les auteurs proposent une nouvelle mesure générique de la synchronie de croissance pour quantifier la perte de synchronisation due à la variation aléatoire des paramètres cellulaires ou à l'hétérogénéité spatiale. La variation du taux de consommation maximale désynchronise complètement la culture simulée, mais la variation du volume à la division ne se fait pas. Une nouvelle mesure de l'hétérogénéité spatiale est introduite : l'écart type des concentrations de substrats telles que constatées par les cellules. L'hétérogénéité spatiale désynchronise la croissance de la population en divisant la population en deux parties de manière synchrone croissante à des taux différents. Pour une hétérogénéité spatiale suffisamment élevée, la population semble se développer de manière totalement asynchrone.

L'une des utilisations possibles du système Rubam [247] est également un cadre de modélisation de l'évolution, qui peut nous aider à étudier le processus de l'évolution dans des conditions différentes et étudier les effets que les différents paramètres du modèle induisent sur les organismes et l'écosystème. Un avantage important des modèles des écosystèmes bactériens de calcul, comme Rubam, réside sur le fait qu'ils permettent d'étudier

le processus d'évolution des moyens qui sont actuellement impossibles aux écosystèmes bactériens naturels.

Dans RapidCell [248] les auteurs ont utilisé leur modèle pour étudier la chimiotaxie selon différents gradients, et ont proposé un nouveau type de gradient d'activité constante permettant d'étudier systématiquement le comportement de la chimiotaxie des bactéries virtuelles. Dans leurs travaux, ils ont analysé un réseau moléculaire avec deux boucles de rétroaction positive pour détecter les régions de multistabilité et montrer comment le mécanisme du quorum sensing dépend de différents paramètres du modèle. Ils ont montré, en particulier, que la capacité de commutation du réseau conduit à plus de contraintes sur les paramètres dans un environnement naturel où les bactéries elles-mêmes produisent des auto-inducteurs que par rapport à des situations où les auto-inducteurs sont introduits à partir de l'extérieur.

3.3.2.3 Type de bactéries

Les modèles de simulations d'écosystèmes bactériens reposent sur l'étude des comportements individuels des bactéries, leur mouvement, leur division, leur reproduction, ainsi que leur métabolisme. Le modèle BacSim [121] présente les propriétés bactériennes, y compris l'absorption de substrat, le métabolisme, la maintenance, la division cellulaire et la mort au niveau de la cellule individuelle. Pour la diffusion de substrat, une diffusion de treillis bidimensionnels est utilisée.

Les organismes qui sont capables d'exploiter efficacement les ressources disponibles accumulent progressivement assez d'énergie pour la reproduction (par fission binaire) leur permettant de générer des copies d'eux-mêmes dans l'environnement. Les organismes sont également capables de produire leurs propres ressources, qui peuvent potentiellement être utilisées comme marqueurs pour envoyer des signaux à d'autres organismes (un comportement appelé Quorum Sensing). Les relations complexes entre les stimuli et les actions dans les organismes sont stochastiques et modifiées au moyen de mutations, permettant ainsi aux organismes de s'adapter à leur environnement et de maximiser leur durée de vie et le succès de leur reproduction. L'aptitude d'un individu ne peut être évaluée qu'en la soumettant à un environnement, et ce, en la laissant interagir avec lui pendant un certain temps (généralement jusqu'à ce que ses réserves d'énergie sont épuisées).

Les simulations du modèle Rubam [247] sont réalisées dans un nouveau type de gradient de substance attractive qui garantit un niveau constant d'excitation chimiotactique quelque soit la position. Le mouvement chimiotactique optimal dans un gradient a été démontré comme résultant d'un juste équilibre entre l'excitation et l'adaptation. Par conséquent, les gradients raids exigent des taux optimaux d'adaptation ultérieure. Les simulations montrent que la variabilité intercellulaire observée du temps d'adaptation, qui est causée par le bruit de l'expression des gènes, peut jouer un rôle positif pour la population bactérienne dans son ensemble, en permettant à ses sous-populations d'être tactiquement optimales dans des gradients de différentes forces.

RapidCell [248], un modèle hybride de la chimiotaxie de la bactérie *Escherichia coli* qui combine le traitement du signal Monod-Wyman-Changeux par des clusters chémorécepteurs mixtes, la dynamique d'adaptation est décrite par des équations différentielles, et un modèle détaillé de mouvement tumbling de la cellule.

Dans le modèle [177], la transduction du signal est modélisée par une chimie artificielle modifiable à base de règles (AC) qui définit toutes les liaisons et les productions de protéines. En codant le génotype de chaque bactérie comme une séquence d'ADN virtuel

interprétable comme une chimie artificielle. Chaque bactérie contient des concentrations de modules définis par l'utilisateur qui interagissent à chaque pas de temps en fonction de règles spécifiées par l'utilisateur ainsi que des conditions environnementales. Les modules peuvent être codés pour des opérons (sites d'ADN régulateurs), des protéines et des complexes, permettant la simulation de nombreux scénarios biologiques. Trois expériences distinctes ont été effectuées avec ce simulateur de bactéries.

3.3.2.4 Les comportements selon les objectifs étudiés

Les auteurs de BacSim [121] ont étudié la croissance de la cellule *Escherichia coli* dans une colonie. Les ressources fournissent l'énergie qui est nécessaire pour les organismes à maintenir en vie, et peuvent déclencher différents types de comportements dans les organismes, tels que les mouvements vers les nutriments et l'évitement des substances toxiques, la croissance et la libération contrôlée des ressources de signalisation. L'équilibre entre l'énergie et la matière est modélisé avec soin pour s'assurer que l'écosystème soit dissipatif.

Dans Rubam [247] les organismes peuvent se reproduire et produire des ressources spécifiques leurs permettant de communiquer ensemble. Dans Rubam, deux types de processus d'évolution ont été utilisés afin de démontrer que l'évolution qu'on ne peut pas observer dans la nature peut être reproduite artificiellement.

Les concepteurs de RapiCell [248], l'ont utilisé pour étudier la chimiotaxie dans différents gradients, et ont proposé un nouveau type de gradient d'activité constante dans le but d'étudier systématiquement le comportement de la chimiotaxie des bactéries virtuelles.

Dans [177], les auteurs ont présenté un modèle à base de cellules permettant la prolifération de micro-colonies bactériennes dans le but d'étudier la manière dont les réponses au niveau de la population peuvent émerger à partir des propriétés de signalétiques et mécaniques des cellules individuelles. Ils ont étudié deux variantes de signalisation au sein de populations bactériennes homogènes (homotypique) ainsi que la signalisation et la concurrence au sein des populations hétérotypiques mixtes. Ils ont étudié en particulier comment la taille, la densité cellulaire locale, et le confinement spatial de la population affectent la croissance de la colonie dans le but de prévoir des stratégies pour faciliter la détection de quorum. Un simulateur de bactéries permettant des expériences contrôlées par l'utilisateur a été créé afin que les différents ensembles de règles et les paramètres environnementaux puissent être testés et évolués. Trois expériences distinctes ont été effectuées avec le simulateur de bactéries.

3.3.3 Les écosystèmes artificiels de calcul

Dans le domaine de la vie artificielle, plusieurs écosystèmes ont été conçus au début des années 90. Parmi eux, *Tierra* [190] et *Avida* [5] qui sont basées sur des populations de chaînes capables de se reproduire avec une base génétique soumise à des mutations aléatoires de obéissant à la loi de Poisson. *PolyWorld* [252] et *Gaïa* [87] sont des simulateurs écologiques à deux dimensions qui étudient l'évolution des agents concurrents contrôlés par des réseaux de neurones. *DarwinPond* [244] et *GenePool* [242] représentent des mondes virtuels à deux dimensions où les organismes sont physiquement simulés, ces organismes sont appelés «swimbots» et «nageurs», et évoluent au fil du temps.

Bien d'autres écosystèmes plus évolués ont été réalisés un peu plus tard et sont en train d'évoluer jusqu'à ce jour, nous en présentons certains d'entre eux dans la suite de ce document.

3.3.3.1 Tierra : Thomas Ray

Durant les années 1991-2001, Thomas Ray développait le projet Tierra [190, 191] afin de réaliser un écosystème de calcul d'autoréplication de code de programme, qui a été le premier système d'évolution artificielle connu basée sur la sélection naturelle. La mémoire de Tierra représente l'environnement de l'ordinateur et les programmes représentent les individus. Les programmes se disputent les ressources du microprocesseur et la mémoire afin de survivre. Les programmes évoluent par mutation, croisement et réplication. Son but était de modéliser des conditions similaires à la terre autour de la zone du Cambrien, lorsque depuis des répliqueurs simples, une augmentation explosive de la diversité de la vie s'est produite.

Même si Tierra n'a pas tout à fait réalisé cet objectif, Ray a signalé certains phénomènes d'évolution intéressants [191] et son succès a inspiré plusieurs autres modèles qui sont basés sur Tierra. La compétition dans Tierra résulte depuis un temps fini du CPU et de l'espace mémoire. Tierra est basé sur un système d'exploitation virtuel, avec son propre langage machine, par ailleurs relativement robuste et simple (mais universel), et un espace d'adressage de taille fixe. Un terme évolutif commence par l'ensemencement de l'espace mémoire vide avec un programme d'autoréplication écrit à la main. Ce programme de réplication produit alors une copie de lui-même qui est instanciée comme un processus indépendant.

Une petite quantité de comportements stochastiques est mise en œuvre pour l'exécution du programme, la copie du processus, et les programmes sont également soumis à des mutations ponctuelles. Ces mécanismes sont responsables de l'introduction de la variété dans les populations. Si les programmes modifiés conservent leur capacité à se répliquer, et les modifications modifient leur probabilité de reproduction, l'évolution darwinienne peut se produire. Une fois la mémoire fixe remplie par des programmes, une fonction «moissonneuse» [191] est appelée, elle a pour tâche de tuer des programmes en fonction de leurs âges, ainsi que les programmes qui ont produit des erreurs lors de l'exécution. Les adaptations évolutives observées dans Tierra ont largement baissé selon deux catégories : l'optimisation du processus de réplication résultant de la reproduction rapide, et les phénomènes écologiques comme «parasitisme» où les programmes ont perdu leurs capacités de reproduction. Ils ont, néanmoins pu exploiter certains mécanismes du système d'exploitation Tierra pour exécuter le code d'autres programmes pour la reproduction.

Même si la plupart des adaptations qui se produisent dans la Tierra ont ensuite été expliquées comme des effets secondaires des propriétés spécialement conçues à partir des spécifications du langage [230], ou à la suite de très peu de mutations [46], Tierra a démontré qu'il est possible de construire un système d'exploitation dans lequel le code informatique auto-répliquatif peut évoluer.

Enfin, Ray a étendu la plate-forme Tierra originale (avec Thearling) pour inclure des programmes multithread en cours d'exécution sur une connexion-machine de soixante-quatre processeurs [198, 232]. Plus tard, il a proposé une version entièrement réseau NetTierra [197] qui présentait l'évolution réussie de la multicellularité différenciée.

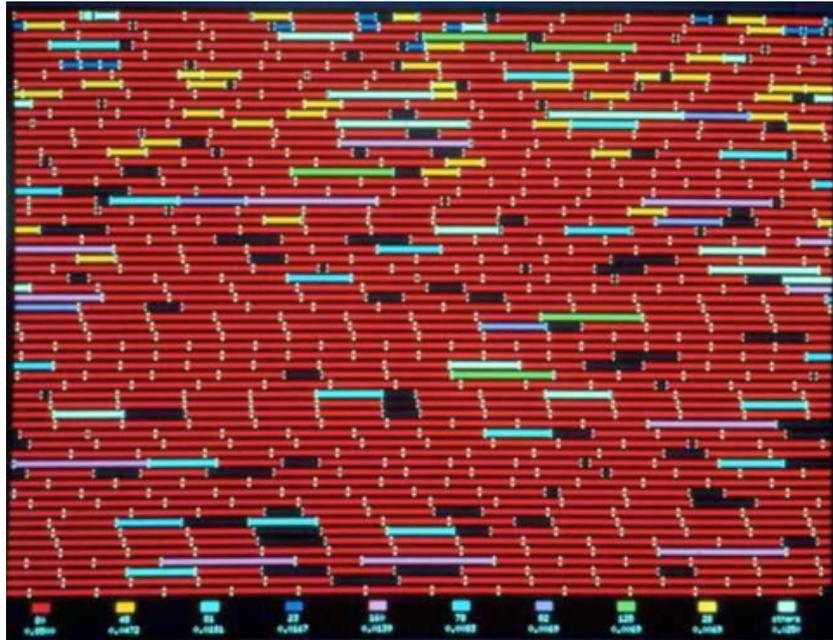


FIGURE 3.1 – Tierra : Les programmes les plus petits en jaune sont des parasites qui profitent des capacités de réplifications des autres programmes.

3.3.3.2 Avida : Chris Adami

Les auteurs [5] ont présenté un nouveau système de vie artificielle inspiré de Tierra, des interactions locales et de la géométrie à deux dimensions et ce sur la base d'un mécanisme de mise à jour semblable à celui des automates cellulaires 2D. Il a été constaté que la géométrie spatiale est propice au développement de la diversité et améliore ainsi les capacités d'adaptation. Il a été également démontré la force d'adaptation du système de reproduction des cellules avec des capacités de calcul simples, d'une part. D'autre part, une étude a été réalisée sur la dépendance de cette capacité d'adaptation sur le taux de mutation et la taille de la population. La plateforme Avida [5, 161] a été utilisée pour étudier de nombreux aspects de l'évolution. Entre autres, les questions liées à la complexité dans l'évolution [6, 7], à l'origine des caractéristiques complexes [7], et à la stabilité écologique [128].

Avida est une plateforme logicielle expérimentale pour la recherche dans le domaine de la biologie du calcul évolutionnaire [161]. Durant les dernières années, Avida a été utilisé pour effectuer des recherches novatrices sur l'évolution de la bio-complexité [127, 128, 7]. Avida a permis de fournir aux chercheurs des outils pour étudier le processus évolutif de façon plus détaillée en des temps plus avantageux qu'auparavant. Dans une des expériences réalisées sur la plateforme Avida, les organismes numériques autorépliatifs s'affrontent dans une population d'état stationnaire et de taille fixe. Chaque organisme réside dans une cellule (un organisme par cellule) et comprend une liste circulaire d'instructions de (son génome) et un processeur virtuel capable d'exécuter ces instructions. Les cellules sont organisées selon une topologie bien précise et utilisent une grille à deux dimensions. Chaque processeur virtuel dispose de trois registres 32 bits (AX, BX et CX) et deux piles capables de stocker jusqu'à dix nombres de 32 bits.



FIGURE 3.2 – Ces images montrent l'évolution d'une colonie d'organismes digitaux au sein du logiciel Avida. Chaque couleur représente une variété d'organismes possédant un génome donné. Au début de l'expérience, la population n'est constituée que de quelques individus quasi identiques. Cependant, génération après génération, les avidiens se reproduisent, subissent des mutations, et évoluent. Comme résultat, en quelques heures, la boîte artificielle de pétri compte plusieurs milliers d'habitants dotés d'aptitudes différentes

3.3.3.3 PolyWorld : Larry Yaeger

PolyWorld [252] est un autre écosystème informatique précoce. Dans cet écosystème, des agents haploïdes avec un ensemble de comportements primitifs (se déplacer, tourner, manger, muter, attaquer, poursuivre la lumière, se concentrer) peuplent un environnement continu contenant, outre les agents eux-mêmes, un certain nombre de sources d'énergie (nourriture).

La prédation, la mimique, la reproduction sexuée et même les communications sont toutes prises en charge d'une manière directe. Les stratégies de survie résultantes, à la fois individuelle et collective, sont purement émergentes, telles que le sont les fonctionnalités contenues dans leurs réseaux de neurones "cerveaux". Les comportements complexes résultant de l'activité des neurones simulés sont imprévisibles, et changent de la même façon que la sélection naturelle au bout de plusieurs générations. Les agents ont des taux métaboliques variables pour lesquelles ils consomment de l'énergie (un taux métabolique de base, et un coût associé à l'activation de comportements et de l'activité neuronale). Ils doivent consommer à partir de sources de nutriments pour survivre et se reproduire. Les agents sont contrôlés par des réseaux de neurones artificiels (RNA) qui reçoivent leurs entrées à partir d'un «système de vision» (une carte de pixels de l'environnement rendue à partir du point de vue des agents).

Le génome encode certaines propriétés physiologiques (taille, force, etc.) et les RNA (le réseau de neurones) d'un agent. Par ailleurs, les RNA sont exprimés de façon probabiliste, et les forces synaptiques sont adaptées durant la durée de vie des agents par l'apprentissage de Hebb. Une exécution de PolyWorld commence par la création d'un certain nombre d'agents de semences aléatoires. Si ces agents ne parviennent pas à établir une population auto-entretenu par la reproduction, une fonction de fitness ad hoc (qui récompense les actes de consommation de nutriments, les actes de mutation, les déplacements, etc.) est appliquée pour garantir un nombre minimum d'agents dans l'environnement. Ceci transforme efficacement le système en un algorithme génétique équilibré (a steady state genetic algorithm) jusqu'à ce qu'une stratégie réussie de comportement soit trouvée [252]. Une fois la stratégie trouvée, ce mécanisme est désactivé et l'évolution par la sélection naturelle se produit.

Des articles plus récents enquêtent sur des outils de la théorie de l'information pour quantifier l'évolution de la structure neuronale et la complexité [254], les tendances passives et entraînées dans l'évolution de la complexité [253], et la notion écologique de la

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

distribution libre idéale (la façon selon laquelle les animaux se répartissent entre plusieurs correctifs alimentaires) par rapport aux agents évolués [89]. Dans d'autres documents, l'environnement est initialementensemencé avec des agents de fabrication artisanale «pro-génitrice» qui sont préprogrammés pour présenter [89, 253, 254] des comportements «raisonnables» comme s'approcher des sources de nourriture et éviter les attaquants. Aussi, les pistes de simulation suivies dans les études semblent toujours curieusement courtes (par exemple, 10.000 pas de temps) pour la sélection naturelle afin d'avoir un effet profond.

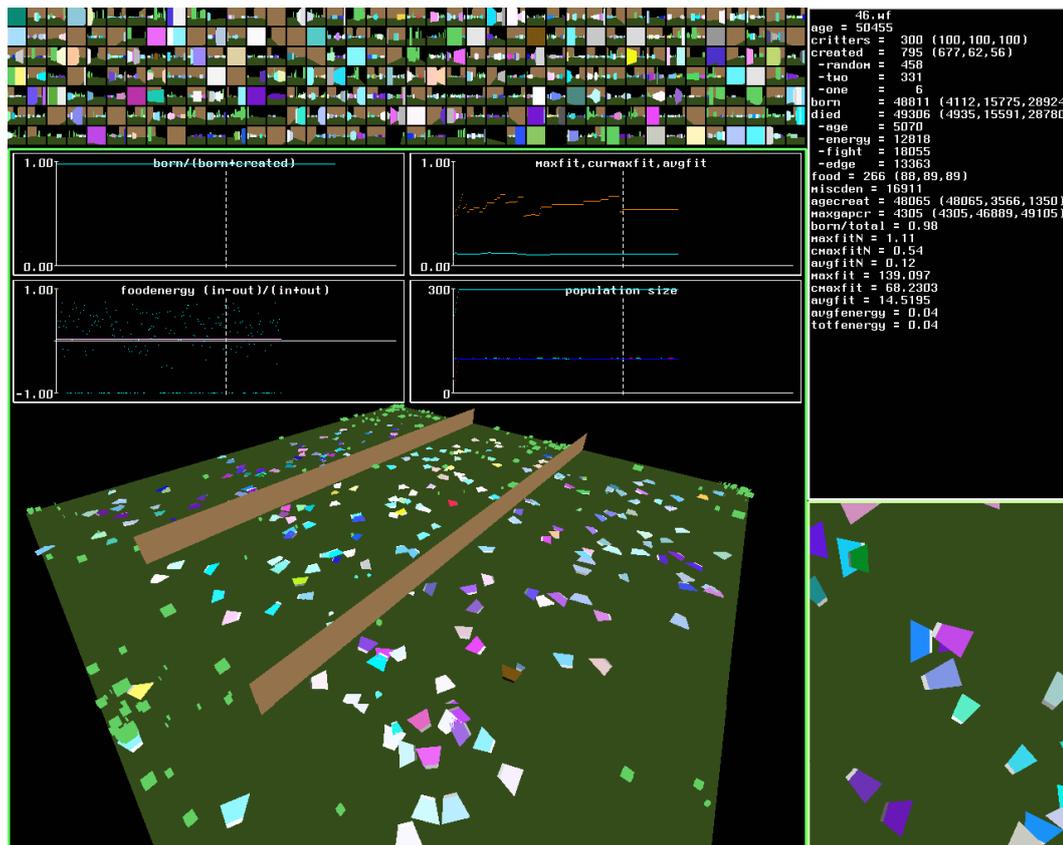


FIGURE 3.3 – Capture d'écran du simulateur écologique PolyWorld peuplé par plusieurs sous-espèces apparentées, mais distinctes. Le panneau plus grand montre une vue d'ensemble du monde : le plan vert foncé représente le sol, les objets bruns représentent des barrières infranchissables et les pièces vertes lumineuses sont de la nourriture alors que les organismes sont multicolores. Au-dessus de ce graphique, les quatre courbes relatent les différents paramètres de simulation. Un peu au-dessus, de ces courbes, dans la partie supérieure de la figure, de nombreuses petites vues du monde tirées du point de vue de chacun des organismes dans le monde : ce sont les images vues par ces organismes. En haut à droite quelques statistiques numériques décrivant la simulation. Et dans le volet en bas à droite, on peut voir une vue rapprochée zoomée du "plus fort" organisme actuel [252].

3.3.3.4 Gaia : Nuno Gracias

Gaia [87] présente un simulateur d'écologie pour l'étude de certains aspects de l'écologie et de la biologie, comme l'apprentissage, l'évolution et la dynamique des populations.

Le simulateur est un monde artificiel, où deux types d'espèces peuvent évoluer : autotrophes et hétérotrophes. Les individus hétérotrophes représentent des créatures capables de se déplacer, de manger, de se combattre et de muter. Ils ont un système nerveux simple, un réseau de neurones avec une entrée rétine. L'apprentissage associatif de Hebb est utilisé dans la modification des synapses. Les caractéristiques de structure du système nerveux et physiologique sont codées dans le génome de la créature. Ils naissent et grandissent selon une répartition géographique définissable en termes de taux.

Les résultats suggèrent que l'apprentissage chez les animaux avec les systèmes nerveux très simples est principalement phylogénétique. L'apprentissage associatif de Hebb semble jouer un rôle mineur par rapport à la sélection naturelle des structures génétiques des systèmes nerveux. Il semble également que, l'apprentissage de Hebb dans les réseaux de neurones avec les topologies et tailles utilisées dans Gaia, ne peut pas expliquer les mécanismes élevés de l'apprentissage associatif. Il a été constaté un lien profond entre la complexité des comportements émergeant et les difficultés posées par le monde.

Dans les mondes où il était très facile de survivre, seules les créatures muettes sont apparues. Mais si les mondes étaient difficiles (comme avoir peu d'éléments de nutriments), des êtres intelligents apparaissaient. La nature emprunte toujours le chemin le plus simple. L'étude du comportement a montré que la caractéristique la plus importante réside dans la capacité de reproduction. Tout comportement intéressant, comme l'évitement d'obstacles, ne peut « survivre » que s'il est relié à une bonne stratégie de reproduction. Cela diffère des AG classiques. Dans les AG, chaque nouvelle fonctionnalité est exprimée en termes de fitness. Dans Gaia, même si l'on présente une bonne stratégie de nourriture, cette fonction va disparaître si on ne peut pas se reproduire.

3.3.3.5 Gene Pool : Jeffrey Ventrella

En 1996, une simulation de vie artificielle animée, appelée Darwin Pond développé par Rocket Science, a été conçue, et un article décrivant la simulation a été publié [244]. Dans Darwin Pond, des centaines d'organismes physiquement simulés ont atteint la locomotion par un moteur de contrôle et une morphologie d'origine génétique. La possibilité d'avoir plus de descendants est une conséquence directe de deux facteurs : 1) une meilleure capacité à nager à l'intérieur d'un espace critique vers un partenaire choisi, et 2), la capacité d'attirer d'autres organismes qui veulent s'accoupler. Parce que le système Darwin Pond a été développé dans une entreprise de jeux informatiques, il comportait, entre autres, un volet interactif significatif. Rocket Science n'a pas survécu en tant que société, et après beaucoup d'efforts, Darwin Pond a été libéré de la complexité juridique des sociétés et du monde des logiciels de jeux, et il a été publié gratuitement là, où il est resté.

Gene Pool a été développé comme une dérivation de Darwin Pond. Gene Pool [244, 242, 245, 246] est un écosystème aquatique bidimensionnel peuplé par des créatures appelées swimbots. Ces créatures ont une morphologie et un comportement, mais l'intérêt de ces travaux réside dans l'environnement (figure 3.4). La simplicité de l'environnement physique étant plus simple, ceci permet de faire évoluer un grand nombre de créatures. La morphologie des créatures est composée de rectangles aux angles arrondis qui sont reliés par des articulations. Chaque créature est composée d'une dizaine de blocs, en moyenne.

Chaque créature possède une quantité d'énergie qui diminue lors des déplacements et de la reproduction des créatures. Les créatures sont sexuées et la sélection est naturelle. Elles peuvent regagner de l'énergie si elles trouvent de la nourriture répartie, qui est initialement dans l'environnement. Pour cela, elles ont la possibilité de déceler la nourriture

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

qui est disposée à proximité. Elles essaient ensuite de s'orienter vers cette nourriture en actionnant leurs membres contrôlés par des fonctions sinusoïdales pondérées. Les créatures cherchent aussi à se reproduire selon leur état qui est décrit par diagramme d'états comportant quatre possibilités et deux actions : recherche d'un partenaire ayant envie de se reproduire, se diriger vers le partenaire, rechercher de la nourriture, se diriger vers la nourriture, se reproduire et manger. La recherche de partenaires se fait à l'aide de cinq critères : la taille (petit, grand), la corpulence (mince, gros), la couleur (similaire, opposée), la réactivité (actif, mou) et la silhouette (droit, tordu). Ces caractéristiques déterminent ainsi les espèces. Les espèces qui ne sont pas adaptées pour se nourrir ou se reproduire finissent par disparaître lorsqu'elles n'ont plus d'énergie.

La simulation commence donc avec une population initiale tirée aléatoirement. La nourriture y est présente. L'utilisateur peut alors observer en temps réel l'évolution des espèces grâce à une interface et une grande panoplie d'options. Parmi elles, la possibilité de manipuler les créatures en les déplaçant, les reproduire, les supprimer, modifier leur énergie, etc. Il est aussi possible de modifier leur environnement, de leur ajouter de la nourriture et d'en constater les effets. Au cours de ces simulations, Ventrella, en les observant, met en évidence de nombreux comportements. À titre indicatif, lorsqu'il favorise la reproduction des individus dont les couleurs sont opposées, très vite, il y observe une grande diversité de créatures colorées. À l'opposé, lorsqu'il favorise la reproduction des créatures dont les couleurs sont similaires, très vite chaque espèce converge vers une couleur uniforme. Il y observe aussi les capacités d'adaptation de la sélection naturelle lorsqu'il change brutalement les critères d'affinité de la reproduction.



FIGURE 3.4 – Gene Pool 5.

3.3.3.6 Life Drop : Marc Métivier

Life Drop [148] est un écosystème comparable à celui de Gene Pool [246]. L'un de ces objectifs est de fournir un modèle pour l'étude de la complexité de la dynamique des espèces dans le cadre d'un vaste projet d'adressage «l'évolution de la complexité» dans différentes classes de systèmes dynamiques [92]. Ces travaux sont dans la lignée de Tierra, Avida et Gaia [190, 5, 59]. L'environnement prend place dans une goutte d'eau artificielle (figure 3.5) et prend en compte des données comme le pH, la fluidité de l'eau, ...

La morphologie des créatures appelées biomorph est inspirée des travaux Dawkins [58]. L'état interne et la perception des créatures sont basés sur le modèle de Brooks [40]. Le modèle physique qui permet aux créatures de se déplacer dans l'environnement s'inspire de celui de [204]. Une créature se compose donc de quatre couches : son génotype composé de 32 bits, son métabolisme primaire, son comportement réactif et son comportement cognitif. Chaque créature possède plusieurs états possibles comme l'énergie, la faim, la fécondité et le l'état de stress. Elle interagit ensuite avec l'environnement par le biais de plusieurs actions comme chercher un partenaire, chercher de la nourriture, fuir un danger, se déplacer aléatoirement, etc. De plus, les créatures se reproduisent entre elles, et ce, suivant leur affinité génétique et leur niveau de stress. Il faut noter que c'est généralement le phénotype qui est utilisé pour l'affinité.

Trois types d'expériences sont mises en place. La première prend en compte un environnement favorable pour laquelle le nombre d'espèces se stabilise dans le temps. Dans les deux dernières expériences, l'environnement subi des crises, la hausse du pH etc. Le nombre d'espèces diminue lors des crises et ré-augmente en fin de crise. Les expériences montrent ainsi l'implication du stress sur la dynamique des populations.

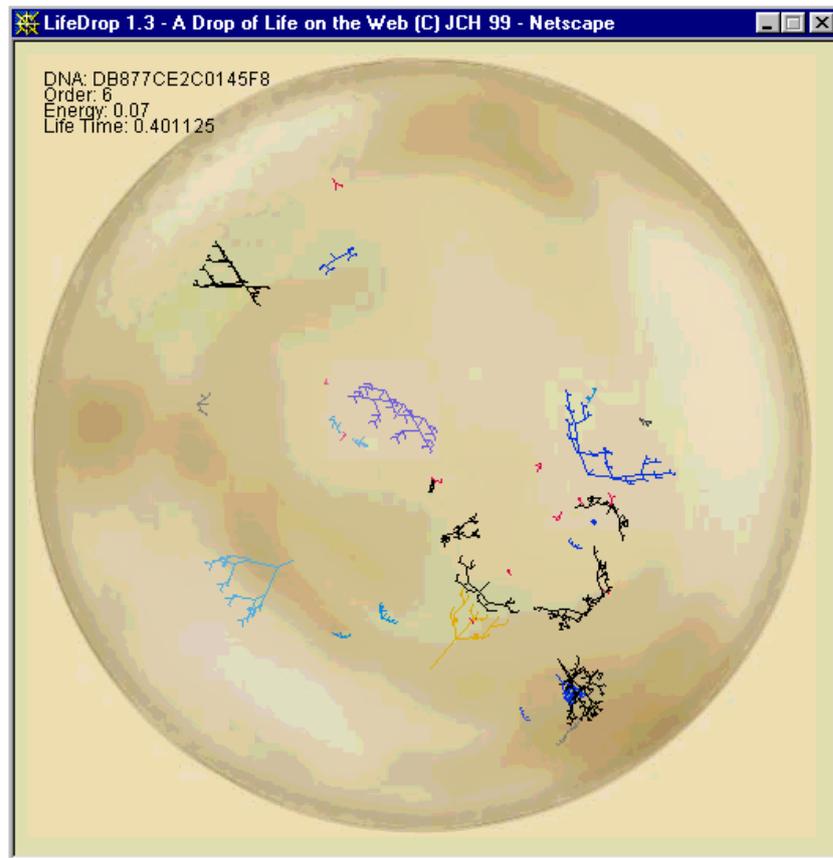


FIGURE 3.5 – Une capture d’écran de la première version de LifeDrop montrant un petit ensemble de créatures qui se déplacent dans l’environnement 3D.

3.3.4 Synthèse

Dans cette partie du chapitre nous allons faire une petite synthèse des travaux sur les écosystèmes présentés plus haut selon leurs caractéristiques, telles que la nature du corps des créatures artificielles simulées dans ces écosystèmes, leurs mouvements ainsi que leurs comportements, leur durée de vie (dépense d’énergie) et certaines des caractéristiques génétiques telles que le type du codage (génome) ainsi que les opérateurs de reproduction (croisement et mutation). Nous allons aussi les comparer selon les types d’environnement utilisés dans leurs écosystèmes, et à la fin nous présentons les différentes mesures statistiques effectuées pour ses modèles.

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

Caractéristiques	Tierra	Avida	PolyWorld	GenePool	Gaia	Darwin Pond	Life Drop
Corps	Programme d'autoréplication	Une cellule de la grille de l'environnement	Agents en forme géométrique multicolore	Créatures autotrophes et hétérotrophes	Bouche, bas-ventre et 2-10 parties pour mouvoir (Swimbots)	Segments de lignes 2D	Biomorph
Mouvement	/	/	Se déplacer, tourner, manger, muter, attaquer, poursuivre de lumière, se concentrer	Se déplacer, manger, combattre et muter	Natation en utilisant les parties, le même algorithme pour tous les Swimbots	Se déplacer en drag,	chercher de la nourriture, un danger, se déplacer aléatoirement
Comportement	Exécution du code	Exécution du code	La prédation, la mimique, la reproduction sexuée, et même la communication	Recherche de nourriture et évitements d'obstacles	Rechercher de la nourriture, se reproduire et manger	chercher la nourriture	la dynamique des espèces
Durée de vie	Âge (temps)	pas res- treinte	Energie	Métabolisme	Métabolisme (Energie)	Energie	Energie
Gène	chaîne est elle-même un génome (programme)	chaîne est elle-même un génome	Le génome encode certaines propriétés physiologiques (taille, force, etc.) et les RNA (le réseau de neurones) d'un agent	Les caractéristiques de structure de système nerveux et physiologique sont codées dans le génome	(?)	Morphologie codée	génotype composé de 32 bits

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

Espace phénotypique	programme	une chaîne finie construite d'enseignement du langage.	Contrôleur et capacités de l'agent dans l'environnement.	contrôleur	Longueur, largeur, phases, amplitudes et les attachements de chaque partie	Créature en locomotion par un moteur de contrôle (anatomie et mouvements)	Contrôleur de mouvements
Mutation	mutation, croisement et réplifications	Mutation Poisson-aléatoire	Muter et reproduction sexuée	Croisement et mutation	Algorithme de croisement avec mutation, Swinbot choisit dans son champ de vue un partenaire qui satisfait la plupart de ses attractivités	Les créatures sont sexuées et la sélection est naturelle	Les créatures sont sexuées et la sélection est naturelle
Conditions de mutation	/	/	ils doivent manager des sources de nourriture pour survivre et se reproduire	Une fonction de fitness défini explicitement	Swinbots se-mutés lorsqu'au moins l'un d'entre eux poursuit l'autre et la distance entre les organes génitaux est inférieure à la longueur du vecteur génitale	Une meilleure capacité à nager à l'intérieur d'une distance critique à un partenaire choisi, et, la capacité d'attirer d'autres organismes qui veulent s'accoupler.	L'énergie, la faim, la fécondé et le stress

Environnement	Mémoire de l'ordinateur, et les ressources du microprocesseur et de la mémoire ainsi que les tâches.	Une grille de cellules en forme de tore, les ressources et les tâches de l'environnement	un environnement continu un plan (le sol), contenant, des barrières infranchissables, de la nourriture, et les organismes en multicolores.	Rectangle 2D avec des murs, des obstacles des sources de nourritures et créatures (autotrophes et hétérotrophe).	Pool rectangulaire. Quantité constante d'énergie dans l'environnement,	Environnement 2D liquide avec des créatures et des sources de nourritures.	Une goûte d'eau artificielle
Statistiques	Probabilité de reproduction. Les adaptations évolutives observées	Viseur d'instructions, détails des chaînes, etc.	Trois architectures neuronales envolées dans PolyWorld	Evolution de concurrence entre espèces, évolution de populations Autotrophe et hétérotrophes	Graphes de nombre de Swimbots contre nourriture, caractéristique des créatures d'individus, le meilleur dans l'attraction / mutation / consommation	Observe et met en évidence de nombreux comportements. Observe une grande diversité des créatures colorées. Il y observe aussi les capacités d'adaptation de la sélection naturelle	Le nombre d'espèces se stabilise dans le temps. l'environnement subi des crises, hausse du pH. l'implication du stress sur la dynamique des populations.

TABLE 3.1 – Synthèse des travaux d'écosystème de calculs.

3.3.5 Autres écosystèmes

3.3.5.1 Ecosystèmes de Mauno Rönkkö

Les auteurs de cet écosystème artificiel [205] l'ont conçu en utilisant des éléments de base, des parfums, des plantes et des animaux. Les deux éléments de base sont le sol et l'eau. Le sol est considéré comme fixe et immobile, formant un paysage statique, mais inégal. L'eau, à son tour, est émise par des nuages. Les parfums sont émis par les plantes et les animaux. Les plantes dans l'écosystème sont des lames individuelles de l'herbe. Les animaux sont constitués de deux espèces : les vers (Worms) et les coléoptères. Comme les coléoptères absorbent de l'énergie à partir de vers de terre, qui absorbent de l'énergie à partir de brins d'herbe, qui absorbent de l'énergie à partir de l'eau. De plus, il existe une chaîne alimentaire qui connecte les animaux aux éléments de base.

La nouveauté de l'approche proposée réside dans la technique de modélisation : l'ensemble de l'écosystème a été modélisé en utilisant un système de particules. Par conséquent, la dynamique d'interaction physique montre non seulement des dynamiques émergentes, mais également des propriétés réalistes intéressantes. Le principe de leur contribution réside dans le fait qu'ils ont formalisé le système de particules et l'ont utilisé pour modéliser et analyser l'écosystème.

3.3.5.2 Ecosystème depuis la chimie artificielle

Les auteurs de ce deuxième écosystème [69] proposent une approche mixte vie artificielle/écologie dont l'objectif est de démontrer qu'une chimie artificielle simple peut soutenir l'existence d'organismes autotrophes et hétérotrophes, leurs interactions entre eux et avec l'environnement abiotique. Un écosystème émergent virtuel de la simulation peut alors intégrer les cycles naturels de la matière et d'énergie entre organismes de différents niveaux trophiques et leur environnement abiotique. L'approche offre une alternative conceptualisation de l'écosystème virtuel qui intègre les avantages de la chimie artificielle et simulations écologiques individus centrés des échelles de temps évolutionnaire.

3.3.5.3 Ecosystème DOVE

Les réseaux trophiques sont des modèles abstraits qui représentent les relations de qui mange qui dans les écosystèmes. Les représentations classiques du réseau trophique ne comprennent généralement pas la plasticité phénotypique, dans lequel une espèce répond aux changements dans la densité des autres espèces par la modification des caractéristiques telles que le comportement et la morphologie.

Ces changements, qui sont probablement adaptatifs, auront une incidence sur l'ampleur des effets directs et indirects de la fitness de l'espèce. Des données empiriques montrent que la plasticité phénotypique est susceptible d'avoir des répercussions importantes sur la structure et la dynamique des communautés écologiques. Alors que les études théoriques soutiennent cette démarche, il est difficile de comprendre ce que peuvent nécessiter de nouvelles approches théoriques.

DOVE (Digital Organisms in a Virtual Ecosystem) [176] est un système qui permet d'étudier les comportements des organismes numériques dans un écosystème virtuel, il a été proposé pour résoudre le problème de réseaux trophiques. Ses caractéristiques comprennent une approche centrée-individu, dans lequel un type d'algorithme génétique est

utilisé pour faire évoluer le comportement des animaux dans un environnement dynamique. Il présente un aperçu des problèmes écologiques qui ont motivé la création de DOVE et sa structure et le fonctionnement de base. Les auteurs de ce travail ont également discuté les types de décisions et les compromis qui ont été considérés pour que DOVE soit aussi simple que possible, mais encore assez riche pour leur permettre d'aborder les questions fondamentales auxquelles ils se sont intéressés. Ils ont ensuite utilisé DOVE pour examiner les stratégies de récolte (fourragement) optimale de proies en présence de la fluctuation des risques de prédation, et montrent que les niveaux d'activité sont très dépendants de la densité des concurrents d'une manière qui serait difficile, voire impossible, d'explorer avec les techniques traditionnelles. De plus, d'autres études pilotes de DOVE, suggèrent qu'il peut être utilisé pour mieux comprendre l'origine et les conséquences de la plasticité phénotypique et d'autres propriétés des communautés écologiques.

3.3.5.4 Ecosystème utilisant FCM

Dans cet écosystème [88], les auteurs ont présenté un modèle prédateur-proie basé individu. Pour la première fois, chaque comportement d'un agent est modélisé à l'aide d'une carte cognitive floue (FCM : Fuzzy Cognitive Map), permettant l'évolution du comportement de l'agent à travers les cycles de la simulation. Le FCM permet à l'agent d'évaluer son environnement (par exemple, la distance des prédateurs ou des proies, la distance potentielle du partenaire de reproduction, la distance des nutriments, le niveau d'énergie) et de ses états internes (par exemple, la peur, la faim, la curiosité, ...), et de choisir plusieurs actions possibles telles que l'évasion, la faim, ou la reproduction.

Le FCM de chaque individu est unique et est le résultat du processus d'évolution. La notion d'espèce est également mise en œuvre de manière à ce que les espèces se dégagent de l'évolution de la population des agents. Ce système est considéré (d'après les auteurs) comme le seul qui permet la modélisation des liens entre les comportements et la spéciation. La simulation produit un grand nombre de données, y compris le nombre d'individus, le niveau d'énergie par individu, le choix de l'action, l'âge des individus, et la FCM moyenne associée à chaque espèce. Cette étude examine les modèles de processus macro-évolutifs, tels que l'apparition d'espèces dans un écosystème simulé, et propose un cadre général pour l'étude des problèmes écologiques spécifiques comme les espèces envahissantes et les motifs de la diversité des espèces. Les résultats montrent des comportements cohérents de l'ensemble de la simulation avec l'émergence de modèles de fortes corrélations également observés dans les écosystèmes existants. Les résultats obtenus sont très prometteurs même avec un système dynamique à plusieurs niveaux très complexes et adaptatifs (impliquant un modèle comportemental permettant des effets de rétroaction et la mémoire à court terme, un grand nombre d'individus en interaction, un système de ressource alimentaire à plusieurs niveaux, l'émergence et l'évolution des espèces, etc.). La dynamique d'ensemble du système à tous les niveaux semble être cohérente et présente des modèles de forte corrélation entre ses composantes.

3.3.5.5 Vers des comportements écologiques : Nicolas Chaumont

Des organismes 3D articulés simulés physiquement sont capables de se nourrir à partir de sources de nourritures existantes dans divers lieux au sein de leur environnement de simulation, après que ses performances aient été répétées à plusieurs reprises. Ses fourrageurs [49] sont capables de survivre de manière autonome dans un environnement ouvert

où ils peuvent se reproduire après avoir recueilli suffisamment de sources de nourriture, les auteurs ont trouvé une population durable. L'évolution artificielle des comportements de fourrages alimentaires chez les animaux à pattes qui ont été simulés s'est avérée être une tâche notoirement difficile. Dans ce cas de figure, ils font co-évoluer la morphologie et le contrôleur pour des organismes virtuels dans un environnement physique réaliste à trois dimensions pour produire une locomotion avec des jambes pour atteindre un but.

L'utilisation la plus immédiate de ces robustes fourrageurs évolués est de simuler une population de clones dans un environnement ouvert, pour voir si, en recueillant suffisamment de nutriments, ces individus peuvent se reproduire et donner naissance à une population durable. Une telle confirmation ouvrirait un chemin droit à des expériences écologiques où le rayonnement adaptatif peut donner lieu à des écotypes diversifiés, et des espèces distinctes, finalement, entre autres expériences. Le potentiel d'expérimentation évolutive d'une telle population est énorme. À titre d'exemple, la morphologie et le comportement d'un type d'organismes peuvent fournir d'importantes contraintes qui pourraient empêcher le flux génétique inter-espèces par l'intermédiaire de la non-viabilité hybride avec des morphologies et des comportements d'un autre organisme.

Dans leurs travaux présentés dans [48], les auteurs ont proposé un système *in silico* dans des niches écologiques qui ne sont pas explicitement définies, mais se présentent comme la conséquence de la combinaison de la configuration de l'environnement et l'adaptation de sa population résidente. La population se compose de trois dimensions, la recherche de nourriture de manière autonome, des créatures en forme de bloc ([212], p.353) ([50], p.139) avec des capacités sensori-motrices qui sont contrôlées avec un réseau de neurones leur permettant de coexister dans leur monde, et concourir pour les ressources qui s'y trouvent. Dans leur mise en œuvre, ils ont reproduit de façon asexuée, et le génome qui code la morphologie et le comportement qui est réalisé grâce à un réseau neuronal qui contrôle ses mouvements tout en réalisant des mutations lors de la reproduction. Le monde dans lequel les créatures vivent est un environnement tridimensionnel simulé physiquement où les ressources énergétiques sont constamment renouvelées. Les créatures meurent si leur énergie est épuisée, alors qu'elles naissent d'un parent qui a accumulé assez d'énergie pour se reproduire. Il n'existe pas de fonction de fitness explicite dans ce système. Cependant, puisque les fourrageurs pauvres meurent rapidement, on assiste à une forte pression de sélection pour passer vers des gènes du comportement de recherche de nourriture de plus en plus sophistiqués pour la progéniture.

Les niches ne sont pas explicitement définies. Comme il existe une multitude de comportements de recherche de nourriture possibles, le nombre réel de niches est impossible à déterminer. En outre, comme la population change en nombre et en stratégies alimentaires, les possibilités pour tout organisme individuel changent également.

Dans la construction initiale du monde, ils ont inclus plusieurs types de sources alimentaires placées à différentes hauteurs sur des socles, en plus de sources alimentaires distribuées au niveau du sol (figure 3.6). Nous croyons que les traits morphologiques spécialisés ou les comportements qui sont nécessaires pour exploiter ce qu'une ressource particulière peut être, s'il est associé à la recombinaison sexuée, permettent à la sélection perturbatrice de diviser la population initiale en deux ou plusieurs groupes morphologiquement distincts qui deviendront de plus en plus isolés. Ainsi, dans un tel système de vie artificielle, de nouvelles espèces peuvent, en principe, sortir par la spéciation sympatrique, parapatrie, ou allopatrique.

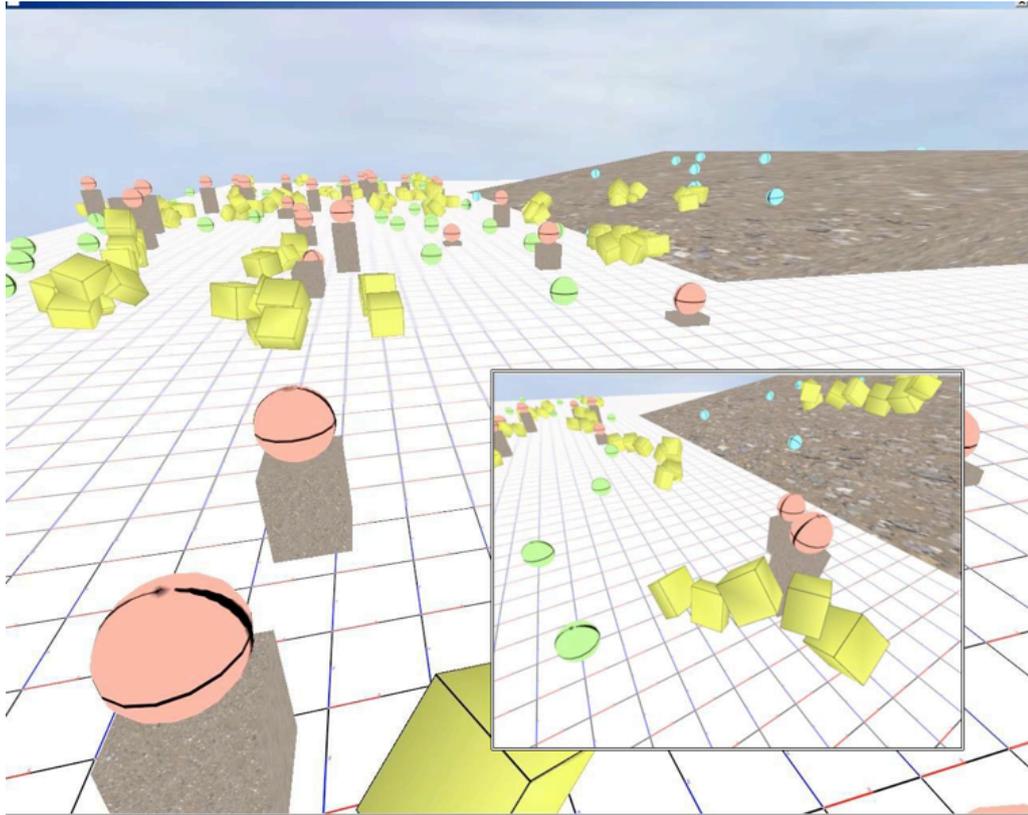


FIGURE 3.6 – Un aperçu d'un monde avec trois types de ressources (sphères vertes, rouges et bleu) qui nécessitent différentes morphologies ou des accès à des comportements. Les organismes 3D sont de couleur jaune. Dans le médaillon (zoom), une créature virtuelle qui bascule un piédestal pour atteindre une sphère rouge de ressources. Les ressources sont bleues sur les pentes et nécessitent une forme de locomotion qui peut contrer le faible frottement de la surface. Les organismes standard ne peuvent pas gravir la pente [48].

3.3.5.6 Ecosystème par chimiotaxie : Joachim Erdei

Les auteurs de ce modèle ont utilisé la plateforme de vie artificielle présentée dans [77, 78] où ils ont analysé l'évolution de la chimiotaxie. Dans ce travail, ils n'ont pas utilisé un algorithme génétique, puisqu'ils croyaient qu'il s'agissait d'un modèle imparfait de l'évolution biologique, car elle nécessite une fonction subjective pour évaluer la fonction de fitness, une propriété émergente de la biologie. Néanmoins, lorsqu'ils ont examiné l'évolution du comportement des animats (c.-à-d. animaux artificiels) qui pourraient s'attaquer aux autres animats [78], les résultats se sont avérés un peu décevants. Bien que la proie ait produit un produit chimique de diffusion, les prédateurs n'ont pas réussi à faire évoluer la capacité d'utiliser le gradient de ce produit chimique pour suivre la proie.

Au contraire, les prédateurs recherchent la nourriture immobile (à partir de laquelle un autre produit chimique est diffusé), puis attendent la proie généralement attirée par la nourriture. Dans un travail plus récent [79], ils ont analysé si le suivi d'une proie mobile peut évoluer dans cette même plateforme de vie artificielle. Dans cet article, ils ont étudié l'émergence d'un comportement de suivi d'une proie chez les animaux artificiels (Animats) dans un environnement liquide simulé en 2 dimensions (voir figure 3.7). Ces "prédateurs" sont contrôlés par l'évolution des réseaux de régulation génétique artificiels [77] codée

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

dans les génomes linéaires.

Le sort des prédateurs est déterminé uniquement par leur capacité à recueillir de la nourriture et de se reproduire, et dans ce cas de figure il n'y a pas de fonction subjective utilisée pour sélectionner les meilleurs individus. La nourriture est livrée à l'environnement par les animats mobiles qui n'ont pas subi d'évolution ("proies"). Leurs résultats montrent une évolution pertinente des comportements plus complexes pour la nanorobotique, la robotique en essaim, et la recherche sur l'évolution des capacités cognitives simples (cognition minime). La tâche considérée dans ce travail est le suivi de ressources mobiles, cette tâche correspond à la poursuite d'un chef dans swarmrobotics, ou la chasse de proies par un prédateur. Seuls les prédateurs («ceux qui attaquent»), subiront toutefois un processus d'évolution.

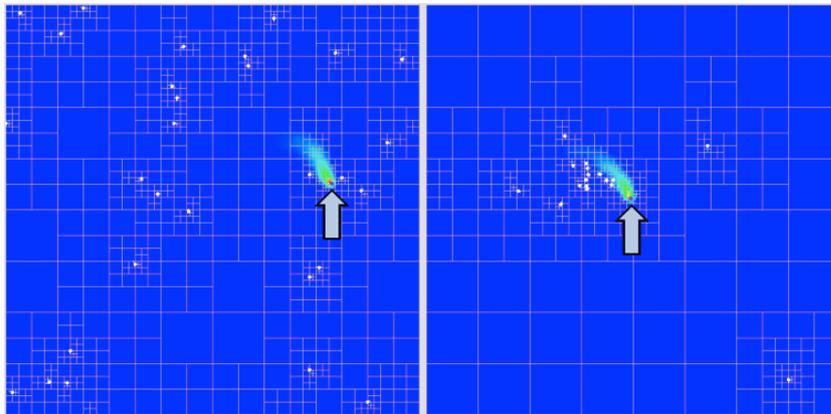


FIGURE 3.7 – Comportement évolué de suivi de proie par des prédateurs. Les prédateurs (les cercles blancs) se dispersent dans tout l'environnement dans la population initiale (à gauche), mais dans les essais avec les survivants de la dernière phase d'évolution (à droite), les prédateurs restent proches de la proie (cercles violets indiqués par des flèches sur les deux panneaux). [79]

3.3.5.7 Ecosystème d'araignées : Michael Palmer

Les auteurs de cet écosystème [170] ont fait évoluer des contrôleurs de robots simulés physiquement "araignées" en utilisant un système à base de règles pour la croissance des réseaux de neurones artificiels. Dans leur approche, les contrôleurs prennent leur entrée à partir d'une "rétine artificielle" qui détecte d'autres araignées ainsi que des objets inanimés comme des barrières dans l'environnement. Par la suite, ils doivent fournir une sortie pour contrôler dynamiquement les 18 degrés de liberté des six pattes du robot à chaque pas de temps. Ils ont, ainsi, effectué des expérimentations de simulation évolutives avec deux espèces d'araignées qui interagissent les unes avec les autres ainsi qu'avec des objets inanimés (c.-à-d. barrière).

Une espèce (le "prédateur") est sélectivement récompensée pour "manger" (en entrant en collision physiquement) avec les autres espèces, et l'autre (la «proie») est sélectivement pénalisée pour avoir été prise, et récompensée pour "manger" les obstacles. Les deux espèces réalisent l'évolution des comportements de locomotion complexe, avec des entrées de leurs rétines ("rétine artificielle") qui produisent le comportement de chasse ou d'évitement. Ils ont ainsi arrivés au constat que la fréquence de sélection dépendant du prédateur-proie peut fournir une mémoire génétique relativement à long terme sur les

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

régions de l'espace du phénotype précédemment recherché, l'application d'une forme de recherche de la nouveauté qui pourrait réduire le double emploi des efforts de recherche de l'évolution.

Les auteurs ont pu ainsi mettre en œuvre un système qui produit la dynamique complexe des prédateurs-proie, dans un environnement physique réaliste, avec un processus de développement générateur produisant les contrôleurs de réseau de neurones. Il s'avère dans la pratique que la «course à l'armement» entre prédateurs et proies en évolution artificielle est non triviale à produire. À titre d'exemple, ils ont d'abord rencontré la situation où la proie s'arrête de courir, afin de ne pas le faire aveuglément entre des prédateurs, car elle n'avait pas encore fait émerger par évolution un cortex visuel efficace.

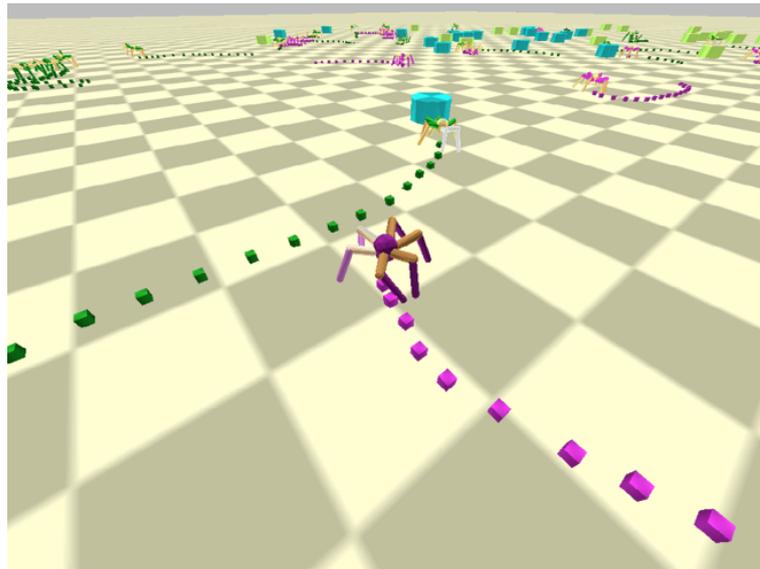


FIGURE 3.8 – Un prédateur (en violet) à la poursuite d'une proie (en vert), qui, à son tour, suit un objet (la barrière) [170].

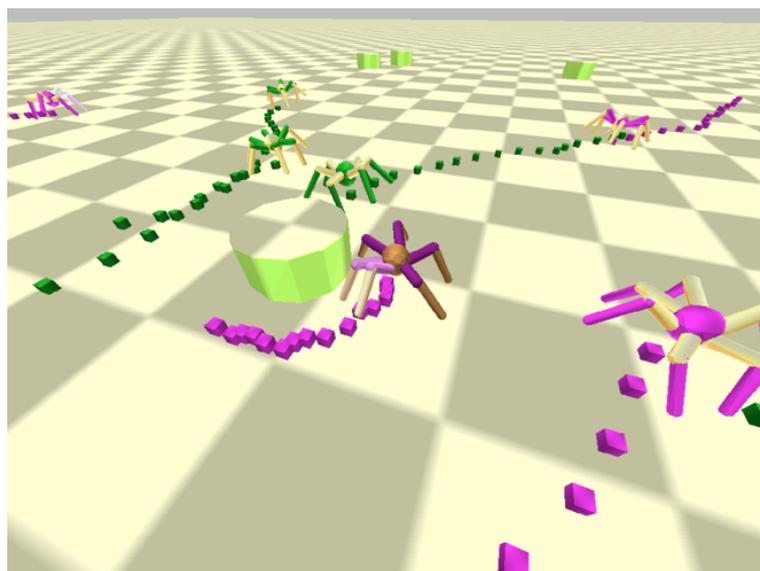


FIGURE 3.9 – Un prédateur (centre, violet) adopte un comportement orbite autour de la barrière, dans l'attente que la proie (vert), s'approche [170].

3.3.5.8 Ecosystème de Marcin Pilat

Le but du travail des auteurs de ce système [101] consistait à explorer l'interaction entre la population et l'évolution dynamique en utilisant une approche de vie artificielle basée sur un environnement 3D physiquement simulé et ce dans le contexte de la coévolution du comportement prédateur-proie et de la morphologie (voir figure 3.10). Les morphologies et les comportements des créatures proies virtuelles subissent un processus d'évolution utilisant un algorithme génétique basé sur les interactions de prédation entre les prédateurs et les proies. Les deux tailles des populations sont également modifiées en fonction de la condition physique.

Les auteurs ont remarqué dans les simulations évolutionnaires deux types de comportements cycliques correspondant à la dynamique à court terme et à long terme. Lorsqu'ils se sont concentrés sur la dynamique à court terme, ils ont observé une simple dynamique cyclique de la population des prédateurs et des proies, ce qui correspond à un type dynamique de la population dit Lotka-Volterra. Ceci est dû au fait que la dynamique de la population était trop rapide pour la dynamique évolutive pour s'en adapter.

En revanche, lorsqu'ils se sont concentrés sur la dynamique à long terme, ils ont mis en évidence des interactions complexes entre la dynamique des populations de ces deux espèces et la dynamique évolutive du trait de la proie. Plus précisément, ils ont constaté la corrélation inverse entre la taille des populations et le volume moyen de la proie, et leurs fluctuations continues, ce qui donne l'émergence de stratégies défensives morphologiques et non défensives des proies. Ceci est dû au fait que la cible de choix pour la proie bascule entre la défense contre les prédateurs et la réduction du coût de la défense selon la taille de la population des prédateurs.



FIGURE 3.10 – Les créatures virtuelles dans l'environnement 3D physiquement simulé. Les grandes créatures correspondent aux prédateurs évolués et les petites créatures correspondent aux proies évoluées. La créature semi-transparente représente une proie capturée [101].

3.3.6 Synthèse

Dans cette deuxième partie des écosystèmes artificiels nous avons essayé de présenter les modèles les plus récents qui ont été réalisés par des chercheurs dont nous avons suivi les travaux depuis des années, et dont certains d'entre eux sont arrivés à leurs buts. A titre indicatif, le chercheur Nicolas Chaumont qui a réalisé un des comportements notables de fourragement de créatures tridimensionnelles physiquement simulées [49], ainsi que Marcin Pilat qui a débuté son écosystème par une étude de comportement de poursuite de sources lumineuses [182], avant d'entamer le comportement de fourragement de sources de nourriture [180], pour finir en construisant un écosystème tridimensionnel dans lequel plusieurs comportements complexes émergent, tel que le comportement prédateur-proie [101]. De même pour Plamer qui a initialement construit son modèle pour faire évoluer des comportements similaires à ceux développés par Karl Sims, en obtenant un réseau de neurones (L-Brain) [169] qui produit des comportements de locomotion très efficaces dans un environnement plat. Il a réutilisé ce système pour développer des comportements prédateur-proie très intéressants [170]. Il y a bien d'autres modèles intéressants que nous n'avons pas cités ici. Dans le tableau suivant, nous comparons tous ces travaux.

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS

La référence	Environnement	Morphologie	Contrôleur	Evolution	Comportements
Mauno Rönkkö [205]	Tridimensionnel constitué d'éléments de base, les parfums, les plantes et les animaux. Les deux éléments de base sont le sol et l'eau.	Figée, les vers (Worms) et les coléoptères.	Un système de particules.	Coléoptères absorbant de l'énergie à partir de vers de terre, qui absorbent de l'énergie à partir de brins d'herbe, qui absorbent de l'énergie à partir de l'eau (sol).	Des dynamiques émergentes et une chaîne alimentaire est construite.
DOVE [176]	2D avec des niches, deux types : animaux et plantes.	Des carrés occupant chacune une cellule de l'environnement.	Un algorithme génétique combinant des capacités à évoluer.	Évolution du comportement par un algorithme génétique.	Fourrage optimal de proie en la présence de la fluctuation des risques du prédateur.
FCM [88]	Environnement 2D avec deux types de créatures et deux types de ressources (herbe et viande).	Créatures 2D du type prédateur et proie	FCM (Fuzzy Cognitive Map).	Des comportements de reproduction et spéciation.	Prédateurs-proies Recherche de nourritures. etc.
Chaumont [48, 49]	Physique avec trois types de sources d'énergie et des pentes et un type de créatures.	Morphologie évoluée, organismes à pattes 3D.	Un réseau de neurones	Coévolution de morphologie et de contrôleur.	Fourrage (recherche de nourritures) et naissance d'une population durable.
Erdei [78, 79]	Environnement liquide simulé en 2D.	Figée représentée par des points 2D.	GRN (réseau régulateur génétique).	Évolution de la chimiotaxie.	Suivie d'une proie mobile.
Palmer [170]	Physique en 3D avec deux types de créatures et des sources de nourriture.	Morphologie figée araignées.	Réseau de neurone artificiel.	Des prédateurs qui mangent des proies qui mangent des sources.	Prédateurs-Proies.
Pilat [101]	Physique en 3D avec deux types de créatures.	Co-évolution de morphologie et de contrôleur.	Un réseau de neurones.	Coévolution entre prédateurs et proies.	Prédateurs-Proies.

TABLE 3.2 – Une synthèse des travaux d'écosystèmes artificiels.

3.3.7 Les Écosystèmes artificiels dans l'Art

Le document présenté par Alin Dorin [67] contraste entre le processus d'utilisation d'un écosystème artificiel et celui lié à l'utilisation des automates cellulaires. Il décrit un certain nombre d'œuvres d'art génératives qu'il a fait évoluer pour utiliser l'écosystème virtuel, et discute leurs avantages et inconvénients dans le contexte de l'art génératif. Le document suggère des moyens par lesquels l'application des quatre caractéristiques souhaitables peut étendre les possibilités de création de ces œuvres. Ce document explore l'application des écosystèmes virtuels dans la tâche de créer des œuvres d'art dynamiques électroniques avec et sans intervention de l'utilisateur. Alors qu'il a été affirmé que la sélection esthétique a vu son apogée en tant que mode d'interaction du public dans le monde de l'art [66], l'écosystème virtuel traité dans son ensemble montre encore un potentiel non exploité pour un certain nombre de raisons. Dans l'article présenté par McCormack et al [141], l'auteur examine le concept d'un écosystème artificiel pour une utilisation dans la découverte créative assistée par ordinateur. Les propriétés et les processus des écosystèmes naturels sont extraits et appliqués à la conception des systèmes créatifs, de la même manière que les méthodes de calcul de l'évolution utilisent la métaphore de l'évolution darwinienne pour résoudre les problèmes dans les questions de recherche et d'optimisation. Le document examine certains des mécanismes et des métaphores appropriés lors de l'application des écosystèmes artificiels à des problèmes dans la conception créative.

Les propriétés générales et les processus liés aux écosystèmes artificiels évolutionnaires sont présentés comme une base pour le développement de systèmes individuels qui automatisent la découverte de la nouveauté sans objectifs explicites téléologiques. Les capacités des espèces à s'adapter à leur environnement entraînent des solutions créatives, de sorte que le rôle du concepteur se déplace vers la conception d'environnements. Ceci permet l'émergence d'une variété de solutions créatives dans le domaine de la simulation sans la nécessité de mesures d'évaluation ou de fitness ni même d'intervention explicite, tels que ceux utilisés dans l'évolution interactive. Par ailleurs, les auteurs abordent les problèmes liés à la découverte créative de calcul, qu'elle soit autonome ou en tandem synergie avec les humains. Un programme informatique génère une sortie comme une combinaison de primitives de base dont l'interprétation doit se situer en dehors du programme lui-même. Les concepts combinatoires et d'émergence créative sont analysés par rapport aux sorties créatives comme étant des combinaisons nouvelles et appropriées de primitives de base, avec la conclusion que le choix du processus de génération qui construit et combine les primitives est d'une grande importance.

Les systèmes sont mis en œuvre comme une pure simulation, où la notion d'écosystème est élargie pour inclure des environnements et des personnages réels comme composantes de l'écosystème. Ils offrent une alternative à l'approche «d'outil logiciel» de logiciels de création classique.

Les auteurs considèrent la créativité en ces termes qu'elle implique la génération de quelque chose de nouveau et approprié au domaine esthétique particulier. Van Langen et al. ont conclu que les conditions nécessaires pour un système de création artificielle résident dans sa capacité à interagir avec son environnement, d'apprendre, et de s'auto-organiser [241].

Contrairement aux tentatives précédentes pour modéliser la créativité, qui ont appliqué des modèles psychologiques, cognitifs, ou qui sont fondés sur la connaissance de la créativité humaine, l'approche écosystémique voit la créativité comme un phénomène émergent de l'interaction dynamique entre, les composants interconnectés auto-organisés

et leur environnement. Ces composants et leur environnement peuvent être internes à une simulation informatique (comme dans le système Colourfield) ou une partie d'un système qui comprend les êtres humains et l'environnement physique (comme avec le système Eden [139]).

Un certain nombre de travaux ont été construits dans le but d'utiliser l'écosystème numérique comme un système génératif avec des degrés variables de succès.

- Listening Sky (figure 3.11) : un environnement sonore interactif de réalité virtuelle dans laquelle les habitants évolués se déplacent à travers la surface d'un globe en chantant et passant leurs chansons à leur progéniture [33];
- Ménière (figure 3.12) : un travail interactif dans lequel les invertébrés virtuels mutent et nagent. Les invertébrés sont visualisés comme une série de disques connectés avec des touffes de poils en forme de cils. Les humains peuvent varier l'espace par réglage de la profondeur et de l'agitation de l'eau en fonction des différentes créatures qui évoluent. Dans leur prise de décision, les créatures ont préféré les profondeurs et certains niveaux d'agitation qu'elles ont trouvés favorables à la reproduction [65].
- Eden, un écosystème évolutif sonore (figure 3.13) : une composition sonore et visuelle dans laquelle une population de créatures errantes en évolution dans un espace de plantes virtuelles et de minéraux. Les créatures communiquent leurs coordonnées et l'emplacement des ressources aux autres de manière audible. Comme elles produisent des descendants adaptés à leur environnement, les modes musicaux émergent pour les appels d'accouplement, les indicateurs alimentaires, etc. L'opérateur humain modifie indirectement les conditions de vie dans l'environnement virtuel en se déplaçant dans un espace physique surveillé par des capteurs infrarouges [140, 139];
- Carrés d'automne (figure 3.11) : une œuvre vidéo (comme une tapisserie), la texture dans laquelle la population des rectangles colorés parcourt une grille à deux dimensions. Colourfield (ou domaine de couleurs) est un écosystème simple avec une seule espèce de motifs de couleurs et de sons. Il se compose d'un monde monodimensionnel discret de largeur n fixe, peuplé par m individus ($0 < m < n$) (figure 3.11). Chaque espace dans ce monde est appelé cellule et peut être occupé par au plus un individu. Les individus occupent une ou plusieurs cellules et sont représentés visuellement par des lignes de couleur et acoustiquement comme une sinusoïde : la fréquence des cartes logarithmiques de teintes; la phase de saturation et l'amplitude de la zone. Une large couleur rouge produit un son fort, profond; une petite couleur bleue produit un ton calme, haut. Une population d'individus produit ainsi un champ de couleur et le son simultanément. Les communautés de rectangles forment la ventilation, mélangeant des groupes de couleur dans un champ visuel d'évolution [64].

3.3. LES ÉCOSYSTÈMES ARTIFICIELS



FIGURE 3.11 – Berry, Dorin, Rungsarityotin : gauche, Listening Sky auditeur inculqué par arcs [33]. Droite, Dorin, Carrés d'automne [64]

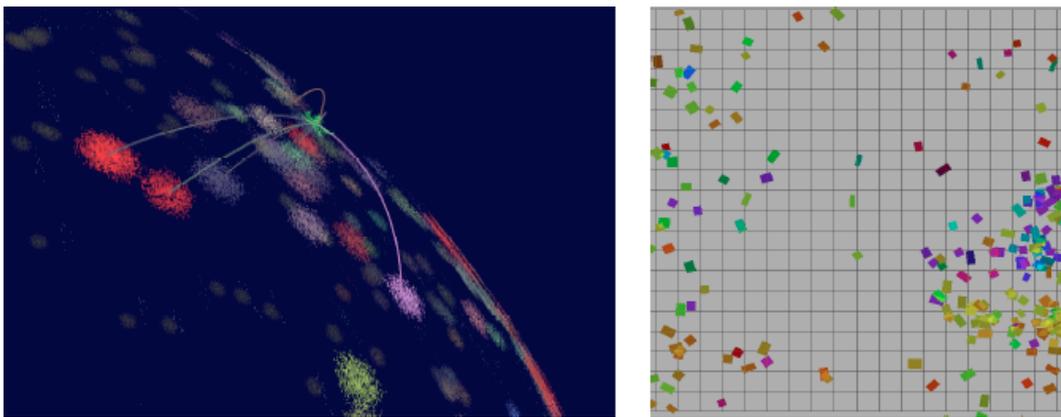


FIGURE 3.12 – Dorin : Ménisque. Gauche : Installation interactive. À droite : détail [65]



FIGURE 3.13 – McCormack : Eden. Gauche : Installation interactive. À droite : détail [140]

3.3.7.1 L'Écosystèmes Habita

La démarche développée par les auteurs [68] présente une nouvelle vision pour générer l'hétérogénéité audio ou visuelle en simulant la formation de l'habitat à plusieurs niveaux par des organismes d'ingénieurs de l'écosystème. Les ingénieurs de l'écosystème génèrent l'habitat par modulation des facteurs environnementaux tels que l'érosion ou l'exposition aux rayonnements, et la fourniture de substrats. Habitat est décrit comme étant une simulation qui fonctionne sur une grille à deux dimensions occupée par une population d'agents fixes en évolution continue.

Les corps de ces agents fournissent, un habitat local différencié pour les nouveaux agents. Ceux-ci évoluent en utilisant un algorithme évolutionnaire classique qui agit sur leurs préférences en matière d'habitat, sur la fourniture et la durée de vie de l'habitat, et qui agit pour remplir l'espace. Cela génère, des structures dynamiques hétérogènes qui ont été utilisées dans une œuvre d'art sonore de prototypage par une simple visualisation.

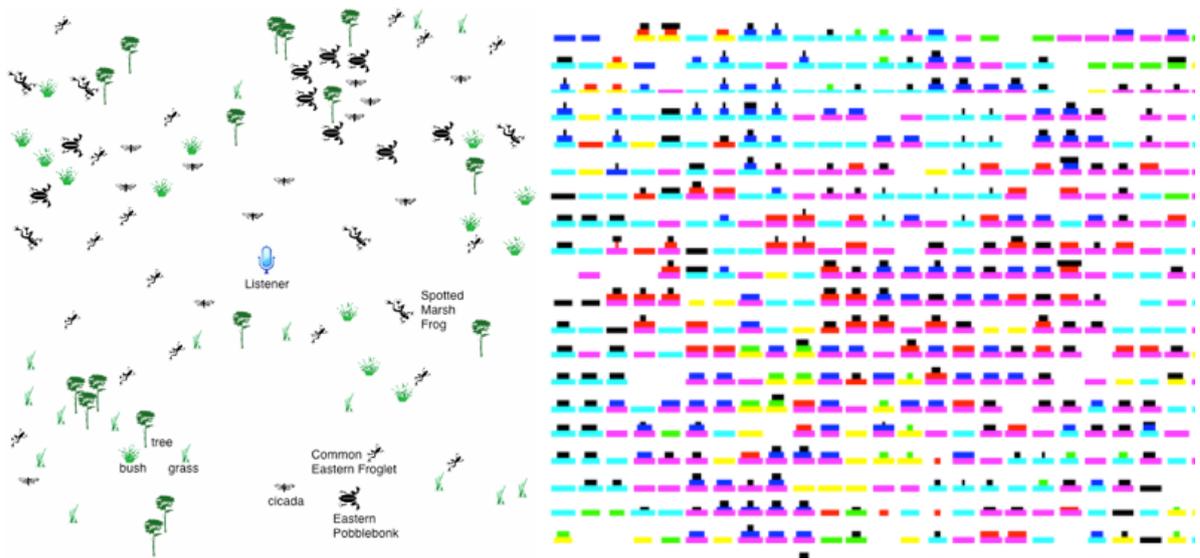


FIGURE 3.14 – À Gauche : Une illustration, section cumulative du score produit par bonification au bout de 60 secondes avec l'évolution arrêtée à 10,000 pas d'animation. À Droite : Niveaux individuels d'habitat.

3.4 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur les travaux abordant les créatures artificielles dans des écosystèmes artificiels. Ces travaux ont été classés en trois catégories, la première concerne les travaux se focalisant sur la chimiotaxie bactérienne et les écosystèmes bactériens. Une deuxième partie sur les principaux écosystèmes de calcul les plus importants, une analyse de ces travaux est également fournie. En troisième lieu, une classification des écosystèmes les plus récents est présentée et commentée. Et en fin de chapitre, nous avons présenté un certain nombre de modèles d'écosystème ans le domaine de l'art.

La modélisation d'un écosystème bactérien par la simulation d'un réseau de chimiotaxie

4.1 Introduction

LES modèles de simulation, propres à la vie artificielle ont mis l'accent sur les aspects métaboliques des organismes unicellulaires utilisant la chimie artificielle.

La recherche dans le domaine de la vie artificielle a également fait des progrès dans l'étude du comportement adaptatif par les modèles informatiques d'organismes artificiels. Des réactions chimiques remarquablement simples peuvent réaliser des mouvements vers des attractifs, et sont en principe capables de moduler le comportement des organismes artificiels.

Nous allons démontrer, dans ce travail, qu'un processus simple de chimiotaxie bactérienne peut expliquer l'émergence de comportements plus complexes observés dans la dynamique d'une population bactérienne.

Une des questions centrales dans les systèmes modernes de la biologie est la façon dont les attributs microscopiques d'une seule cellule influencent le comportement de toute une population.

En termes de chimiotaxie bactérienne, cette question peut être explorée par la recherche de l'influence de signalisation des paramètres réseau sur la dynamique spatio-temporelle des bactéries qui migrent vers des attractants chimiques et s'éloignent des répulsifs. La chimiotaxie de la cellule représente l'un des comportements les plus simples connus. De plus, il est probable qu'elle représente l'un des premiers comportements à avoir existé dans l'histoire de la vie sur terre. Dans la chimiotaxie bactérienne, telle que celle de la bactérie *Escherichia Coli* (*E. Coli*), une bactérie tend généralement à nager selon une démarche aléatoire, ponctuée par de périodes de natation droite *run* interrompues par de brefs *tumbles* qui permettent à la bactérie de changer de direction lorsque la concentration d'attractants ou de répulsifs est uniforme ou indétectable.

En réponse à un gradient d'attractant, cette démarche aléatoire devient biaisée et les bactéries génèrent des mouvements de type *tumble* moins souvent lorsqu'elles rencontrent des concentrations croissantes d'attractants (c'est à dire, elles nagent avec plus de périodes de *run*), alors qu'elles génèrent des mouvements de type *tumbles* plus fréquemment lorsque la concentration de l'attractant diminue [9].

La motivation ayant instruit l'étude de ces organismes simples réside dans notre convic-

tion que la compréhension des mécanismes qui contrôlent leurs comportements est un tremplin vers la compréhension des voies biologiques et des organismes plus complexes.

Notre travail a pour but de présenter un écosystème bactérien dans le domaine de la chimiotaxie des créatures bactérienne de type *E. Coli*. Cette chimiotaxie est simulée en modélisant le processus de traitement du signal par des groupes de chémorécepteurs mixtes en utilisant un modèle d'équilibre rapide (ou algébrique). L'adaptation par la méthylation est réalisée par le biais d'équations différentielles ordinaires (ODE), et des moteurs flagellaires caractéristiques des bactéries *E. Coli* qui induisent des *run* ou des *tumbles* [248].

Le métabolisme est modélisé en tant qu'un ensemble de réactions chimiques intracellulaires. Ces réactions sont conçues pour déclencher des fonctions différentes telles que la division, la mutation et la mort cellulaire. Un des buts de cette étude est de démontrer l'importance du recyclage de la matière des cellules mortes rejetées dans l'environnement.

L'objectif ultime de cette étude est de démontrer l'importance de ces créatures qui jouent le rôle de décomposeurs (c.-à-d. recyclage) des matières de cellules mortes rejetées dans l'environnement. Nous devons ainsi prendre connaissance de l'état actuel des connaissances sur les réactions chimiques d'une cellule bactérienne afin d'expliquer l'évolution des organismes avec un processus de développement très simple (qui est la chimiotaxie bactérienne). Nous allons également démontrer si un processus simple de chimiotaxie bactérienne d'une cellule peut expliquer l'évolution des comportements plus complexes tels que la dynamique des populations bactériennes.

Dans cette partie du manuscrit, nous présentons une description détaillée du modèle proposé concernant la simulation d'un modèle de bactérie *Escherichia coli*. Ce modèle combine, une simulation détaillée d'un réseau de chimiotaxie bactérienne, un modèle de métabolisme ainsi qu'un processus génétique utilisant la sélection naturelle afin d'étudier l'évolution des bactéries dans un environnement virtuel.

Notre modèle est un écosystème de vie artificielle dans lequel les bactéries suivent un processus d'évolution pour réaliser leur chimiotaxie. Dans ce système, les bactéries survivantes ont à surmonter les problèmes de détection des ressources (ou la détection de l'environnement), la modulation de leur mouvement pour générer un comportement de quête alimentaire et de communiquer entre elles afin de produire des comportements plus élaborés. La voie de chimiotaxie d'une cellule est modélisée par une approche hybride qui utilise un modèle algébrique de l'activité des groupes récepteurs, des équations différentielles, la dynamique d'adaptation, et un modèle métabolique qui convertit des nutriments dans la biomasse.

Les résultats montrent une certaine influence du mouvement obtenu à partir de certaines bactéries et leurs effets sur le comportement de la population évoluée. Par ailleurs, le processus évolutif améliore la capacité des bactéries à réagir vis à vis leur environnement et de leur processus de croissance et leur permet, en outre, de mieux survivre. Par la suite, nous proposons d'étudier l'effet de la communication bactérienne émergente lorsque des comportements synchronisés apparaissent, et d'explorer la dynamique des colonies.

4.2 Synthèse de travaux reliés

La modélisation de la dynamique des populations bactérienne indique que la motilité et les capacités de la chimiotaxie peuvent être aussi importantes pour la concurrence de l'évolution que le taux de croissance des cellules [112, 125]. Nous présentons ici une vue d'ensemble d'une gamme d'approches mathématiques et stochastiques qui ont été proposées pour étudier les propriétés du système de réseau de signalisation de chimiotaxie, la façon de reproduire son comportement d'entrée-sortie et simuler la natation des bactéries dans des gradients artificiels *in silico*.

La chimiotaxie bactérienne a été d'abord décrite par TW Engelmann et W.F. Pfeiffer [9, 30] à la fin du 19^{ème} siècle, mais ses mécanismes moléculaires n'ont été assimilés qu'à partir des années 60 [10, 31].

Une cascade de phosphorylation dans un réseau de chimiotactisme a été simulée par Bray et al [37], en utilisant un système d'équations différentielles [129], et une version ultérieure de leur modèle, a ajouté l'adaptation. Spiro et ses collègues [218] ont également intégré la fixation d'attractants, la méthylation, la phosphorylation et l'interaction des CheYp avec les moteurs produisant les mouvements dans leur modèle. Une avancée majeure dans la modélisation de la chimiotaxie a été réalisée dans [14]. Plus tard, dans [146], une analyse théorique d'un système d'équations différentielles (ODEs) complet avec une cascade de phosphorylation incluse ont été effectuées.

Comme modèles déterministes, Morton-Firth et Bray ont suggéré un modèle entièrement stochastique de la voie chimiotactique (ou la Transduction du signal) [154]. Certains modèles hybrides de simulation de la chimiotaxie bactérienne ont été proposés, [209] décrivant l'excitation et l'adaptation de la chimiotaxie avec un modèle simplifié de deux équations différentielles. RapidCell [248], un modèle hybride de chimiotaxie de la bactérie *Escherichia coli* qui combine le traitement du signal Monod-Wyman-Changeux par grappes ou clusters chémorécepteurs mixtes, la dynamique d'adaptation décrite par ODEs, et un modèle détaillé du tumbling de la cellule.

Dans [38], les auteurs ont utilisé un modèle moléculaire détaillé de la voie de signalisation de la chimiotaxie dans la bactérie *Escherichia coli* qui simule les réponses de bactéries à des gradients d'attractants en deux dimensions. Dans [256], les auteurs ont utilisé une simulation par ordinateur des bactéries individuelles pour examiner les propriétés statistiques de leurs aptitudes de natation. Leur objectif étant d'étudier ce comportement de non-équilibre en utilisant des méthodes de dynamique non linéaire, et à les relier à ses origines moléculaires et cellulaires.

D'autres approches ont utilisé leur modèle individuel de chimiotaxie bactérienne pour étudier les comportements de la population tels que cités dans [93], où les auteurs ont modélisé le métabolisme et la chimiotaxie dans la bactérie *E. Coli*. Grâce à la chimiotaxie, les bactéries sont mobilisées dans leur environnement. La transduction du signal est modélisée par une chimie modifiable à base de règles artificielle (AC : Artificial Chemistry) qui définit toutes les liaisons et les productions de protéines.

Ce modèle est également en mesure d'étudier la façon dont la mutation et la succession se propagent à travers les générations de bactéries. Le modèle BACSIM, tel que décrit dans [121] qui est un modèle basé individu, porte sur la croissance bactérienne y compris l'utilisation de substrat, l'entretien du métabolisme, la division cellulaire et la mort.

RUBAM [247] est un modèle de simulation de bactéries utilisant un système de classification floue qui vise la reproduction de l'évolution chimiotactique.

Le modèle proposé par [208] est une abstraction d'un modèle de bactérie *in vivo* telles que la bactérie *E. Coli*, y compris la régulation des gènes pour la transduction du signal et les fonctions comportementales.

Au cœur du système, une population d'individus agit sur un environnement virtuel simple, ayant des comportements spécifiques régis par un réseau de régulation génétique artificiel (GRN).

Dans [86] les auteurs présentent les résultats concernant l'évolution *de novo* de la motilité et la réponse chimiotactique au sein de système d'organismes numériques de la bactérie *E. Coli* qui suivent un gradient.

4.3 Le chimiotaxie

Le système de chimiotaxie permet à la bactérie de sentir le milieu environnemental et provoque une réponse par un changement de rotation des flagelles [250]. C'est ce système qui permet à la bactérie de fuir un environnement néfaste et d'aller en quête d'un environnement favorable [115].

Le système de chimiotaxie est l'un des systèmes de transduction du signal le plus étudié et le mieux maîtrisé à l'heure actuelle en biologie [44, 138]. Ce système est composé d'un complexe récepteurs-kinases organisé en groupes à la membrane de la bactérie. Ce complexe perçoit les stimuli produits par des chimio-effecteurs et transmet le signal au moteur flagellaire par phosphorylation de régulateurs de réponses diffusibles [216].

Pour commencer, la bactérie détecte certaines molécules de l'environnement. Ces composés sont dits « attractants » s'ils sont favorables pour la bactérie et dits « répulsifs » si au contraire ils en sont néfastes. Des récepteurs transmembranaires qui reconnaissent ces composés sont situés au pôle de la bactérie. Ces récepteurs ont donc un rôle de « senseurs » de l'environnement. Ceux-ci sont aussi appelés MCP (Methyl-accepting Chemotaxis Proteins), car ils vont subir une série de méthylation ou de déméthylation sur leur face cytoplasmique.

Lors du contact avec un attractant ou un répulsif, le MCP change de conformation, ce qui modifie son interaction avec les autres partenaires cytoplasmiques du système de chimiotactisme.

La protéine adaptatrice CheW et l'histidine kinase CheA sont en contact direct avec le MCP et réagissent au changement de conformation de celui-ci. Lors de la liaison d'un attractant au MCP, l'activité d'autophosphorylation de CheA est inhibée. Par contre, elle est amplifiée lors de la liaison avec un répulsif.

Une fois phosphorylée, CheA transfère rapidement son groupement phosphorylé au régulateur de réponse CheY. Le régulateur phosphorylé (CheY-P) interagit avec le moteur flagellaire par liaison avec la protéine FliM (dans l'anneau C) et change le sens de rotation du sens trigonométrique au sens inverse, provoquant ainsi un arrêt de la bactérie ou une réorientation [237].

Pour réajuster le comportement de la bactérie face aux changements perpétuels de l'environnement, le système dispose aussi d'un module de contrôle (Figure 4.1). La phosphatase CheZ assure un recyclage rapide de CheY-P par déphosphorylation [143]. Ensuite, ce système va agir sur le MCP par méthylation ou déméthylation (assuré respectivement par la méthylase CheR et la méthylestérase CheB).

Lorsqu'il y a moins d'attractants dans le milieu, le nombre de liaisons d'attractants au MCP diminue, ce qui a pour effet de stimuler l'autophosphorylation de CheA et donc la

phosphorylation de CheY. Ceci provoque une augmentation de la concentration de CheY-P et augmente la fréquence de changement du sens de rotation du moteur. Ceci a pour conséquence finale d'augmenter le comportement de réorientation de la bactérie.

Cependant, ce phénomène a aussi pour conséquence d'augmenter la phosphorylation de la méthylestérase CheB, et donc d'augmenter la déméthylation du MCP. Au final, l'autophosphorylation de CheA diminue, l'activation du moteur également induisant la récupération de la stabilité de départ du système.

Dans le cas d'une augmentation de la concentration d'un attractant dans le milieu, l'autophosphorylation de CheA est inhibée, ce qui réduit la concentration de CheY-P et donc la fréquence du changement de direction du moteur flagellaire. Le nombre de réorientations de la bactérie diminue ce qui lui permet ainsi de nager plus longtemps. De plus, la phosphorylation de CheB va également être réduite, ce qui permet à la méthyltransférase CheR d'augmenter la méthylation du MCP. Ceci stimule l'autophosphorylation de CheA et rétablit le niveau de départ et la fréquence normale du changement de direction.

En résumé, le mouvement de la bactérie dépend en permanence de l'équilibre méthylation/déméthylation du système dynamique du chimiotactisme.

L'adaptation est assurée par des changements dans le niveau de méthylation des chimiorécepteurs : la méthylation augmente le taux de phosphorylation de CheY. Une paire d'enzymes, CheR (R) et CheB (B), ajoutent et suppriment les groupes de méthyles. Pour s'adapter à un attractant, la méthylation des récepteurs doit pouvoir surmonter la répression de l'activité du récepteur provoquée par la liaison attractive. CheA augmente l'activité de déméthylation de CheB [221, 132]. Ce processus est médité par un réseau de protéines tel que présenté dans la figure 4.1 où nous la présentons d'une façon plus simplifiée.

4.4 L'écosystème bactérien

Le processus de chimiotaxie se compose de trois étapes : chimio-réception, signalisation et adaptation [29]. Des protéines chimiotactiques acceptant du Méthyle (MCP) sont disposées le long de la surface de la cellule. Ces protéines agissent comme des chémorécepteurs et se lient avec des produits chimiques dans l'environnement. Elles sont simulés dans notre modèle avec un gène qui décrit la capacité d'une bactérie à mieux détecter les sources de nutriments.

Si un attractif nutritif est détectée à l'extérieur de la cellule, à travers les récepteurs MCPs, le niveau de production de l'histidine kinase CheA diminue parce que les états de récepteurs changent vers l'état « off ». Il a été démontré que l'activité des groupes récepteurs dépend de la concentration de ligand local ainsi que du taux de méthylation selon le modèle MWC (Monod-Wyman-Changeux traitement de signal) [75], [116]. CheA se lie (s'attache) au phosphate dans la cellule (notée CheA-P). Ainsi le groupe de phosphate est transféré à partir de la kinase CheA active vers le régulateur de réponse CheY. La concentration de CheY-P module le moteur et le comportement de la cellule en exécutant un *run* ou un *tumble*.

Un autre processus important dans la modélisation du comportement bactérien est celui de la communication bactérienne inter-cellules, ce dernier est accompli par échange (production, exportation et importation) d'un signal moléculaire chimique dit auto-inducteur. Ce processus, nommé 'Quorum Sensing', permet aux bactéries de contrôler leur environnement, de sentir la présence d'autres bactéries et répondre aux fluctuations de nombre

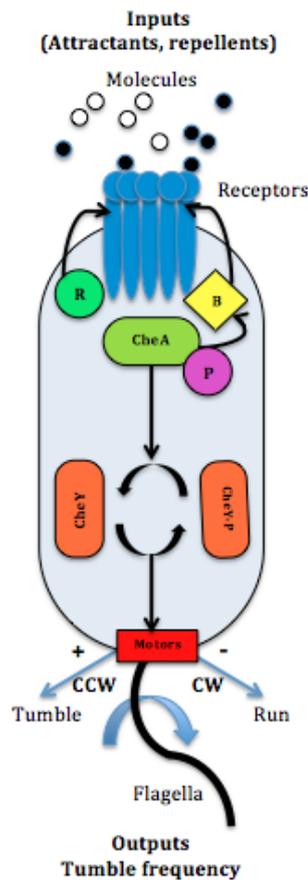


FIGURE 4.1 – La voie de chimiotaxie de *E. Coli*.

ou d'espèces présentes dans l'environnement par changement de comportements [144]. Le Quorum Sensing (QS) est un mode de signalisation bactérien qui repose sur la production de petites molécules médiatrices appelées « auto-inducteurs » (petites molécules diffusibles produites en fonction de leur concentration qui reflète la concentration bactérienne, l'expression de certains gènes) qui sont produites en phase de croissance bactérienne. Lorsqu'un seuil de concentration est atteint, ces auto-inducteurs interagissent avec un régulateur transcriptionnel, permettant l'expression spécifique, en réponse à une forte concentration de cet auto-inducteur, d'un groupe de gènes.

La concentration des auto-inducteurs dans un environnement donnée est proportionnelle au nombre de bactéries présentes. Ainsi, la détection d'un auto-inducteur donne aux bactéries un mécanisme de 'calcul' d'une autre bactérie.

Afin de modéliser ces comportements dans notre modèle de bactérie, nous avons spécifié un autre gène dont le consiste à mesurer la concentration de l'auto-inducteur qui est associé à chaque bactérie.

4.4.1 Le réseau de chimiotaxie

4.4.1.1 Le modèle MWC

Nous avons appliqué le modèle MWC pour un groupe de récepteurs mixtes [75], [116], [147]. Chaque récepteur homodimère est décrit par un modèle à deux états. L'état inactif d'un récepteur possède une plus grande affinité pour la substance attractive que celle de l'état actif. L'ensemble du complexe existe avec tous ses homodimères de récepteurs actifs ou inactifs. La probabilité A que le groupe récepteur, soit actif, dépend de la concentration de ligand et de l'état des récepteurs de la méthylation qui est calculée de la manière suivante :

$$A = 1/(1 + e^{-F}) \quad (4.1)$$

Où $F = F_{on} - F_{off}$, et où $F^{on/off}$ est l'énergie libre du groupe pour être *on/off* dans son ensemble. Par conséquent, l'activité moyenne pour chaque récepteur du groupe est A . La différence totale d'énergie libre dans l'approximation du champ moyen est $F = n_r f_r(m)$, qui est exactement la somme des différences d'énergie libre individuelles entre les récepteurs d'état *on* et *off*.

$$f_r(m) = f_r^{on} - f_r^{off} = \epsilon_r(m) + \log\left(\frac{1 + [S]/K_r^{on}}{1 + [S]/K_r^{off}}\right) \quad (4.2)$$

où $[S]$ est la concentration du ligand (d'attractant), $K_r^{on/off}$ est la constante de dissociation du ligand, respectivement dans l'état *on* ou *off*. L'état de méthylation du récepteur entre par le biais de "l'énergie de décalage" $\epsilon_r(m)$.

4.4.1.2 Le modèle d'adaptation

L'adaptation est modélisée selon l'approximation du modèle de champ moyen de l'assistance de voisinage (AN) [75], [90]. L'adaptation à la chimiotaxie est méditée par deux enzymes, méthyltransférase CheR et méthylestérase CheB.

Il est admis que l'enzyme de déméthylation CheB ne fonctionne que sur les récepteurs actifs et que l'enzyme de méthylation CheR ne fonctionne que sur les récepteurs inactifs au sein de l'AN. Chaque enzyme CheR lié ajoute des groupes méthyle à un taux de $(1-A)$, et chaque enzyme CheB lié supprime les groupes méthyle à un taux bA . On suppose que les deux enzymes fonctionnent à saturation ($[CheR] = 0.16$, $[CheB] = 0.28$) [130] :

$$dm/dt = a(1 - A) [CheR] - bA [CheB] \quad (4.3)$$

Le niveau de méthylation moyen évolue dans le temps comme suit :

$$m(t + \Delta t) = m(t) + kV \Delta t \quad (4.4)$$

Le paramètre k indique le taux d'adaptation par rapport au type primitif (*wild type*) d'adaptation V qui est le taux de méthylation du récepteur (voir équation 4.3) [248].

4.4.1.3 L'activité de la kinase

La liaison d'attractants (du ligand) et la méthylation du récepteur affectent l'activité de CheA. Par exemple, l'augmentation d'une substance attractive inhibe l'activité CheA, mais méthyle par la suite un récepteur spécifique. L'activité kinase CheA [248] est calculée comme étant une variable (dans l'intervalle [0 -1]) :

$$CheA = CheA_{tot}AK_A / (AK_A + K_Y CheY_{tot}) \quad (4.5)$$

Où A est la probabilité qu'un groupe de récepteurs soit actif, $CheY_{tot}$ est la concentration totale CheY qui est égale à 9,7 selon [130], $K_A=5$ et $K_Y=100$ sont les taux constants selon [248].

4.4.1.4 La phosphorylation CheY

La concentration de CheYp est obtenue en fonction de la kinase CheA active de l'équation de l'état d'équilibre [118].

$$CheY = CheY_{tot}K_Y A / (K_Y CheA + K_Z CheZ + g_y) \quad (4.6)$$

Où, $CheY_{tot}$ est la concentration totale de CheY, et $CheZ$ est la concentration totale de CheZ, CheA est actif [$CheA$] et $k_y = 100\mu M^{-1}s^{-1}$, $k_z = 30 / [CheZ]s^{-1}$, $Y = 0,1$ sont des constantes selon [118], [222], [217]. La modification des récepteurs augmente l'activité de CheA et diminue la sensibilité aux attractants.

4.4.1.5 Le biais du moteur de CCW

Le biais du moteur de CCW dépend de la concentration de CheYP selon la forme suivante [54, 211].

$$mb = \frac{mb_0}{CheY(1 - mb_0) + mb_0} \quad (4.7)$$

Où, $mb_0 (= 0,65)$ est le biais du moteur en régime permanent (c.-à-d. dans l'état stable, selon [54]).

4.4.2 Le Métabolisme Bactérien

Le métabolisme est responsable de la reproduction, de la croissance ainsi que par cycles de développement essentiels, qui sont touchés par l'expression des gènes et le mouvement bactérien. Le génome d'un organisme contient des instructions qui codent la capacité de métaboliser un ou plusieurs substrats présents dans l'environnement. Le métabolisme d'un aliment peut accélérer ou décélérer le taux de réplication d'une bactérie par un facteur qui est respectivement positif (nutriments) ou négatif (toxine).

Dans le modèle présenté dans ce chapitre, chaque bactérie est représentée par un génome qui code ses propriétés de base telles que le mouvement, l'absorption d'énergie, l'évitement des toxines et la production des déchets. Ces propriétés sont ajustées à chaque

Metabolism	Value
M_0	25
M_F	+2 units
M_W	+1 unit
M_T	- 2 unit
M_M	- 1unit
M_S	$\Delta M_t/2$

TABLE 4.1 – Les valeurs des paramètres utilisé dans la fonction de métabolisme.

pas de temps en modifiant le génome, et les mutations sont appliquées après chaque processus de division cellulaire.

La simulation de Forrest et Jones [82] permet le recyclage d'un simple matériau à travers l'absorption quand les agents sont créés et libèrent les agents morts et que leurs corps se détériorent. Les matériaux sont collectés par les agents et stockés pendant un certain temps avant d'être libérés dans l'environnement lorsque l'agent meurt. De ce point de vue, nous avons adopté cette idée. Ainsi quand les bactéries meurent, elles sont transformées en des sources d'énergie pour les autres bactéries. (C'est ce qu'on appelle les déchets de bactéries).

L'utilisation d'un modèle de «métabolisme» qui persiste par la décrémentation d'un compteur d'énergie à chaque pas de temps est un pauvre modèle de métabolisme! Il n'y a pas généralement de transformation de la matière depuis la «nourriture» vers les différents types de biomasse ou de déchets.

Nous avons adopté une approche similaire où la matière qui est dans les bactéries mortes est libérée dans le milieu et disponible en tant que source d'énergie pour les autres bactéries de l'environnement. Le métabolisme est calculé comme étant l'énergie totale de l'organisme (la somme de l'énergie de base constante et l'énergie gagnée depuis les nutriments métabolisés) de laquelle est soustraite de l'énergie dépensée pour le mouvement *run* ou *tumble*. Ce modèle métabolique permet aux bactéries de stabiliser leur consommation d'énergie qui finit par atteindre un seuil de division. Une fois que le seuil est atteint, une bactérie se divise et donne une cellule fille. Le cycle de l'énergie bactérienne est mis en œuvre comme suit : (voir table 4.1 pour les valeurs utilisées)

$$\Delta M_t = (M_0 + CA(M_F + M_W) + M_T + mb_0 M_M + M_S)\Delta t \quad (4.8)$$

- ΔM_t est la dépense métabolique totale (taux d'épuisement de l'énergie par étapes) ;
- M_0 est le niveau métabolique de base (niveau initial à la naissance) ;
- CA est le taux d'absorption des éléments nutritifs des bactéries (codé génétiquement comme décrit dans la section suivante) ;
- M_F est la valeur énergétique extraite de la consommation de la source de nourriture ;
- M_W est la valeur énergétique extraite de la consommation des déchets ;
- M_T est le coût métabolique de la consommation des toxines ;
- M_M est le coût métabolique du mouvement ;
- mb_0 est la fréquence de *tumble* obtenue comme le résultat du réseau de la chimio-taxie ;
- M_S est le coût métabolique de la division cellulaire ($\Delta M_t/2$).

4.4.3 La Représentation génétique

Dans la chimiotaxie bactérienne de la bactérie *E.Coli*, la rotation des flagelles est générée par un système intracellulaire de complexité moyenne modulée par la détection du milieu dans lequel la bactérie vit. Ce système présente des propriétés telles que la détection, l'adaptation, et la modulation du moteur.

Afin d'ajuster ces propriétés de façon à simuler les comportements d'une créature bactérienne, on utilise un génome qui code les capacités et les facteurs impliqués (évolués) dans différents niveaux de la voie métabolique responsable de la chimiotaxie.

Chaque gène dans le génome est constitué de deux types de codages différents comme illustré dans la figure 4.2. Le premier type est un codage binaire qui est utilisé dans quatre luci (sites) génomiques. Il est utilisé pour coder des niveaux variables des capacités de la bactérie à détecter des éléments nutritifs ou des toxines avec le même récepteur (M et T). Les valeurs de M et T augmentent avec la concentration des éléments nutritifs détectés. CA représente le taux d'assimilation des nutriments (capacité de consommation), qui affecte son métabolisme (voir équation 4.8). Le gène AC code la sensibilité d'une bactérie à détecter des molécules auto-inductrices de sa propre souche bactérienne, ce qui lui permet de communiquer avec son propre genre en sécrétant des molécules auto-inductrices.

Le second type de codage, exploité dans le reste du génome, utilise des nombres réels. Les sites (ou lucis) suivants constituent les blocs de construction de la voie de chimiotaxie des bactéries : l'activité du cluster (CI), l'activité de la kinase, le niveau de méthylation (Me), la phosphorylation CheY (Y) et le biais du moteur (mb), qui sont utilisées dans les équations de 4.1 à 4.7. Les signaux recueillis par les récepteurs constituent l'information amenée depuis l'environnement à la voie chimique générant la chimiotaxie bactérienne, autrement dit l'ensemble de luci représenté en binaire sert comme entrée pour le fonctionnement de la deuxième partie de ce génome (le réseau de chimiotaxie).

4.4.3.1 Mutation et Division

Lorsque des formes de vie biologique (comme les bactéries) se clonent, les clones ne sont pas des copies exactes de leurs parents [7]. "L'opération de copie" biologique ne fonctionne pas parfaitement car la biologie ne serait pas améliorée par une opération de copie parfaite. Les copies imparfaites en biologie provoquent les mutations et la nouveauté qui permettent à l'évolution de se produire.

Nous avons procédé de la même façon, ainsi une fois qu'une bactérie parvient à accumuler suffisamment d'énergie pour atteindre le seuil de division, elle se clone immédiatement pour produire une cellule fille qui subit ensuite une mutation. Ceci garantit que le matériel génétique de la mère est conservé, tandis qu'au même moment un nouveau matériel génétique est introduit dans la population.

Une faible probabilité de mutation P_M est appliquée sur le génome en perturbant un gène sélectionné avec une petite quantité de bruit. Il faut souligner qu'après la division la quantité d'énergie est également répartie entre la cellule mère et la cellule fille. Ceci garantit que la cellule mère va survivre après la division, et lui permet de produire une descendance multiple au cours de sa durée de vie.

En général, la probabilité de survie d'un individu est directement liée à son efficacité relative dans la population. Par ailleurs, le bruit joue un rôle important dans le monde bactérien. Le réseau est affecté par un bruit dans le récepteur de liaison du ligand, dans la méthylation, et des variations dans les concentrations de protéines (bruit de gène).

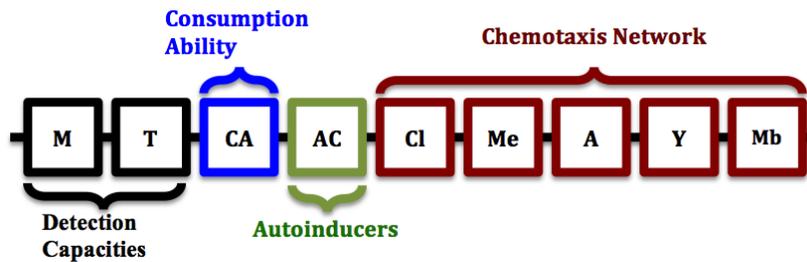


FIGURE 4.2 – La représentation graphique du génome utilisé par chaque bactérie.

Une autre source de bruit intrinsèque résulte des réactions lentes des récepteurs de méthylation. Notamment, les cellules semblent avoir été sélectionnées pour maintenir de faibles niveaux d'expression de CheR, ce qui conduit à un bruit élevé dans les événements de méthylation et des variations à long terme de la production du système. Cette variation peut aider la cellule à explorer l'environnement de manière plus efficace [74].

Dans ce cas, le bruit peut être bénéfique pour les cellules individuelles pour explorer de nouveaux espaces, également en présence de gradient [74]. Ceci va nous guider à choisir d'appliquer ce bruit au niveau de la méthylation dans le réseau de chimiotaxie simulée.

4.5 Paramètres expérimentaux

L'objectif de notre travail est de concevoir un écosystème artificiel peuplé de bactéries. L'ensemble des expériences présentées ici ont été conçues pour répondre à la question de savoir si une simulation d'un simple réseau de chimiotaxie bactérien peut expliquer l'émergence de comportements plus complexes au niveau de la population.

Les bactéries simulées vivent et évoluent dans un environnement bidimensionnel, organisé sous la forme d'une grille subdivisée en cases discrétisées qui contient en plus des bactéries, des sources de nutriments. Le travail présenté ici fait une distinction entre trois types de substances chimiques : (i) les éléments nutritifs diffusés à partir de plusieurs points dans l'environnement, (ii) les nutriments libérés par les bactéries mortes (ou déchets), et (iii) les composés toxiques.

Bien que l'environnement ait été discrétisé, les bactéries peuvent se déplacer librement dans l'espace continu à deux dimensions en translatant leur position. Chaque bactérie est une cellule, avec une forme et une taille identique, et avec un réseau chimiotactique contrôlant leurs mouvements, ainsi qu'avec des génomes artificiels.

Les paramètres utilisés dans la configuration du réseau de chimiotaxie sont présentés dans le tableau 4.2. Au début de chaque essai (exécution), les bactéries sont placées aléatoirement à travers le milieu. Nous avons commencé chaque course évolutive avec 10 bactéries avec des génomes générés aléatoirement. A un moment donné, les bactéries mortes sont remplacées par des éléments nutritifs.

Contrairement au métabolisme des bactéries qui change en fonction du temps, les valeurs du génome ne changent pas, elles changent seulement quand des cellules filles naissent (c.-à-d. la cellule mère garde l'ancien génome, mais la cellule fille en reçoit une copie mutée). Les valeurs des paramètres de simulation ont été choisies pour être les meilleures qui maximisent et prolongent la survie des bactéries. Ces valeurs ont été déterminées empiriquement ou recueillies à partir des résultats de travaux antérieurs.

4.5. PARAMÈTRES EXPÉRIMENTAUX

Paramètres	Valeurs	Références
K_a^{on}	12	[154]
K_a^{off}	1.7	[154]
K_s^{on}	10^6	[75]
K_s^{off}	100	[75]
n_a	6	[75]
n_s	12	[75]
A	1/3	[75]
[CheR]	0.16	[130]
[CheB]	0.28	[130]
[CheY] _{tot}	9.7	[130]
mb_0	0.65	[54]
a	0.0625	[248]
b	0.0714	[248]
Seuil de Reproduction	50	Ce travail
P_m	0.1	Ce travail
Nutriments	10	Ce travail
Concentration des nutriments	1000	Ce travail
Energie	[0, 50]	Ce travail
A	[0, 1]	[248] et ce travail
meth	[1.9, 2.8]	[248] et ce travail
CheA	[0, 1]	[248] et ce travail
CheYP	[0, 2.6]	[248] et ce travail
Motor bias	[0, 0.016]	[248] et ce travail

TABLE 4.2 – Les paramètres utilisés dans le modèle d'écosystème bactérien.

4.5.1 Algorithme générale du mouvement

Initialement, toutes les bactéries de la simulation sont dans un état dit *Etat-stable*, et chaque bactérie peut détecter les nutriments selon leurs valeurs MCP (c.-à-d. capacités de détection), et celles d'évitement de toxines. A ce stade, les bactéries sont en *état de détection* (tel que présenté dans l'algorithme 1). Après cela, si une bactérie a atteint une des sources qu'elle a détectées selon sa zone de détection, elle va les consommer selon son modèle métabolique, donc son état entre dans un état dit *état de consommation*.

Une fois que le seuil de reproduction ait été atteint, la bactérie se divise en deux cellules filles dont une est mutée. La mutation va introduire de la variation à la population. Une fois que le niveau d'énergie d'une bactérie atteint le niveau le plus bas (valeur 0), la bactérie meurt et une nouvelle source de nutrition sera créée à sa place. La simulation se termine si toutes les bactéries de la population sont mortes (c.-à-d. nombre de bactéries égale à 0).

L'algorithme suivant présente les étapes suivies par une bactérie pour se déplacer dans son environnement, selon le réseau de chimiotaxie qui produit la fréquence du mouvement, suivant l'état interne d'une bactérie et aussi suivant les conditions de l'environnement.

Algorithme 1 Mouvement Bactérien.

Sorties : Fréquence de Tumble ;

Initialization ;

Pour (Chaque pas de temps ($t=t+\Delta t$)) **faire** **Pour** (Chaque cellule) **faire** **Si** (État de la bactérie = État de détection) **alors**

Réseau de chimiotaxie() ;

 Calculer la prochaine position de la cellule ($x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t}$) ; **Sinon** **Si** (État de la bactérie = État de consommation) **alors**

Métabolisme() ;

Si (Seuil de reproduction atteint) **alors**

Division() ;

Mutation() ;

Sinon **Si** (État de la bactérie = État stable) **alors**

Marche aléatoire() ;

Si (Niveau d'énergie==0) **alors**

La mort de la bacterie() ;

Si (Nombre de bacterie=0) **alors**

Fin de simulation() ;

Fin Pour**Fin Pour**

4.6 Résultats expérimentaux

Nous avons défini des expérimentations qui consistaient à simuler un écosystème de la vie artificielle, dans le but d'étudier la reproduction des bactéries tout en simulant un modèle de chimiotaxie bactérienne unicellulaire, où les ressources sont représentées dans l'environnement virtuel par des cubes et qui y sont rajoutés chaque 300 cycles. Ce travail est considéré comme la première étape dans la construction d'un écosystème artificiel.

Il existe des raisons impérieuses pour le choix d'un organisme comme *E. coli* en tant que point de départ pour l'étude du cycle de l'écosystème. Il s'agit d'un organisme simple, bien étudié et représentatif. Plus important encore, il est en relation avec les concepts des écosystèmes et des organismes décomposeurs. La bactérie *E. coli* est capable de se déplacer dans son environnement et d'utiliser les ressources qu'il regroupe dans le but d'évoluer et de survivre. Notre écosystème virtuel présente plus de réalisme du fait de l'incorporation des modèles de bas niveau des trois cadres de l'énergétique, de la matière et de l'évolution, ce qui peut ouvrir des voies importantes pour la recherche écologique pertinente dans le domaine de la vie, en particulier dans les domaines où les interactions de l'abiotique et biotique ont un rôle à jouer. Nous avons réalisé des simulations évolutives au nombre de 60 exécutions au total en gardant les mêmes paramètres décrits en dessus, mis à part le coût du métabolisme. Dans les 30 premières exécutions, nous avons fait évoluer des bactéries avec un métabolisme utilisant seulement un compteur comme fonction métabolique sans recycler la matière (c.-à-d. pas de nutriments ajoutés à part ceux rajoutés chaque 300 cycles). La deuxième est décrite par le modèle décrit dans la section 4.4.2 et équation 4.8, où la matière est recyclée

4.6.1 Résultats de Fourrage sans recyclage

Dans cette partie, nous présentons les premiers résultats obtenus [168, 165, 164] d'après un simple modèle métabolique indiquant les 30 premières exécutions où nous avons fait évoluer des bactéries dans un environnement avec des ressources de nourritures ajoutées régulièrement chaque 300 cycles sans autres moyens pour les bactéries pour obtenir de la nourriture à part, éventuellement l'émigration vers une autre niche ou vers un autre environnement.

Tous les essais présentés dans la figure (4.3) montrent une croissance démographique rapide au niveau des premiers vingt cycles de simulation, alimentée par l'abondance de nutriments et de faibles niveaux de toxicité. Cette augmentation est suivie d'un régime élevé de reproduction (ou opérations de division) compensée par le plus grand nombre d'événements de mort, ce qui conduit à une taille de population constante d'environ 200 générations.

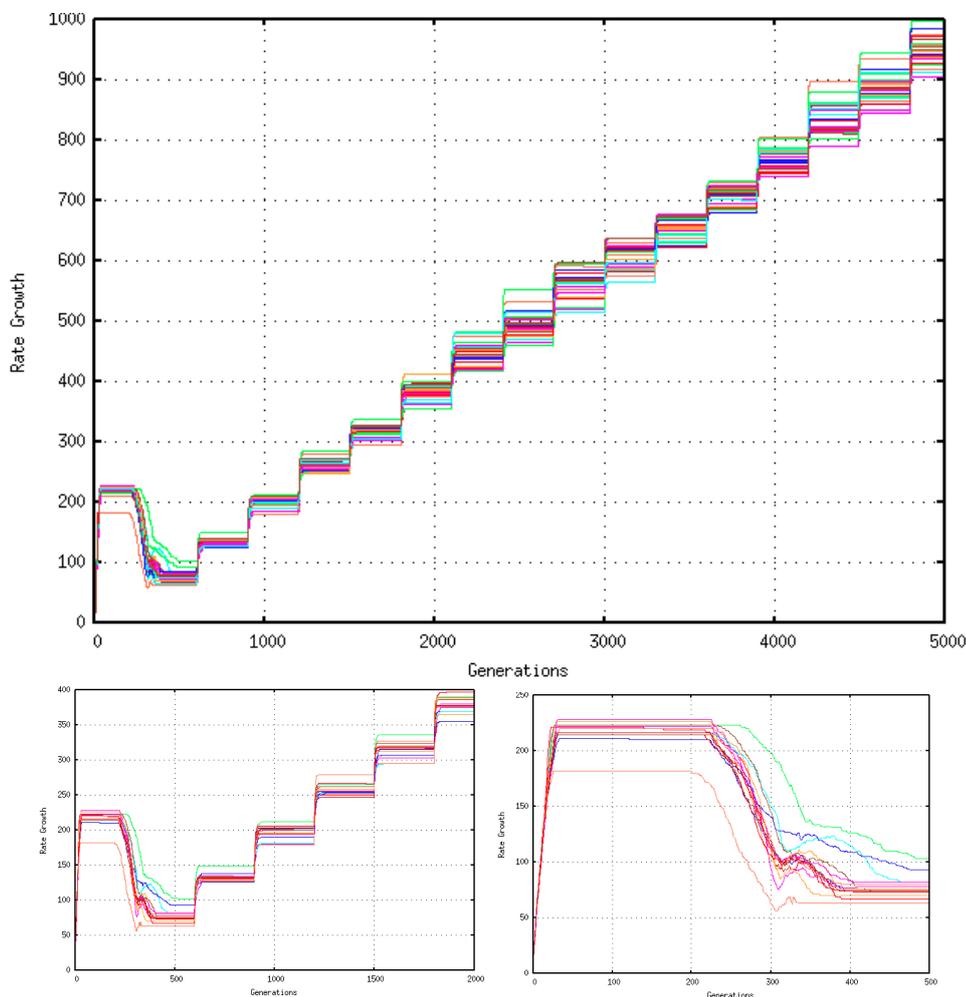


FIGURE 4.3 – En haut, le graphe représentant le taux de reproduction des bactéries sur 5000 générations, que nous avons testé 30 fois avec les mêmes résultats quantitatifs qui présentent les valeurs optimales de la totalité de la population de bactéries. En bas, de gauche à droite, un zoom du même graphe pour les 2000 premières générations et 500 successivement.

4.6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

De la génération 200 à 300, la forte baisse de la taille de la population est due à deux facteurs : un taux élevé de mortalité causée par l'épuisement des ressources alimentaires et composé avec une mauvaise valeur MCP. Pour la génération 300, et tous les 300 cycles, le taux de croissance augmente d'une manière soutenue, ceci étant le résultat de l'effet combiné de l'amélioration des caractéristiques génomiques individuelles par mutation.

Le nombre d'espèces varie considérablement au cours d'une expérience, ce qui indique que des volumes importants de populations se succèdent en raison de la mort et de la division bactérienne. Il est important de garder à l'esprit que la vitesse de toute la dynamique de la population n'est pas uniquement due à l'abondance de nourriture dans l'environnement ou à la taille de la population, mais elle est due en grande partie à des compétences évolutives.

Nous avons suivi les changements de l'énergie de la population totale pour l'ensemble des 30 courses (voir figure 4.4), où les ressources sont consommées, nous avons noté une diminution de l'énergie collective de la population en début de course. Lorsque les divisions cellulaires se produisent à très haute fréquence, ceci entraîne pour la plupart des bactéries l'épuisement de l'énergie dès les 300 premières générations. Les paramètres de simulation ont été ajustés de sorte que dans les trente générations, après que la quasi-totalité de la population soit morte par manque de nutriments, quelques bactéries demeurent en vie.

Au niveau de l'itération 300, lorsque les nouvelles ressources de nutriments sont incluses dans l'environnement, les bactéries se nourrissent et se multiplient jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'éléments nutritifs dans l'environnement. Suite à cela, leur énergie diminue à nouveau, mais plus lentement qu'auparavant.

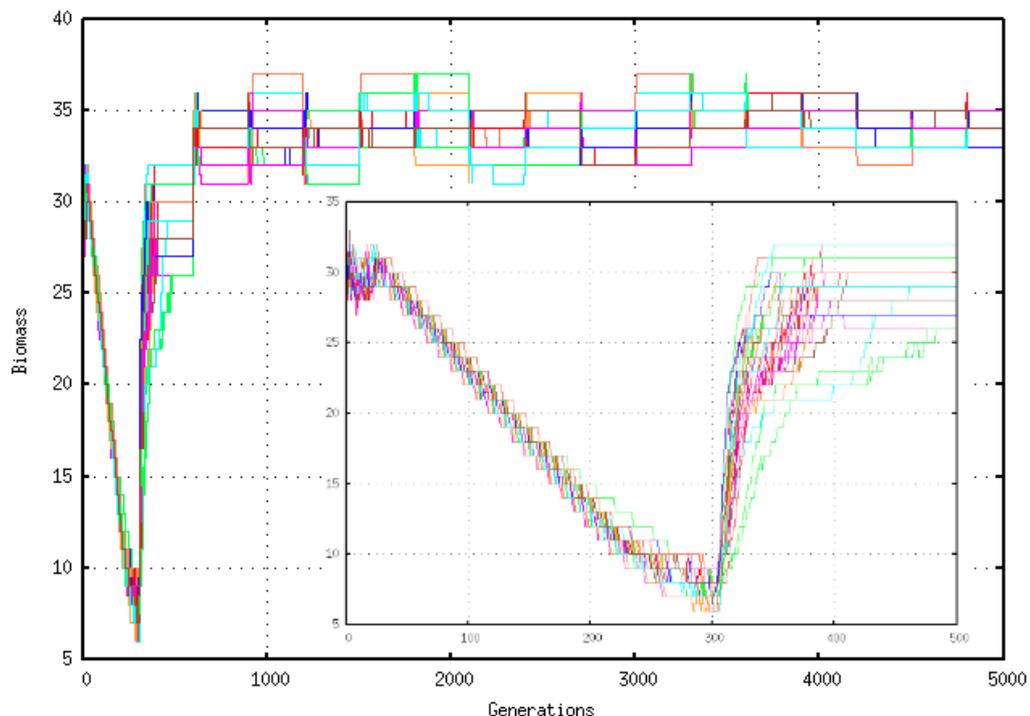


FIGURE 4.4 – La biomasse (énergie totale) de la population de bactéries évoluées au bout de 5000 générations sur 30 exécutions. Sur la figure, un zoom sur le même graphe pour les 500 premières générations où le comportement des 300 premières générations est mieux mis en exergue.

4.6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Après des milliers d'itérations, les bactéries survivantes s'avèrent plus consommatrices d'énergie et plus efficaces et sont en mesure de maintenir un niveau d'énergie plus stable. Cette efficacité est due à une meilleure sensibilité dans la détection des éléments nutritifs (MCP), et de façon plus importante à l'amélioration de la capacité de consommation.

Par ailleurs, l'efficacité d'une voie chimiotactique bactérienne évoluée affecte de manière significative la réponse, qui peut être vue de plusieurs façons : comme la zone de détection, et la valeur de la capacité de consommation.

Si une grande zone est recouverte par une bactérie, on procèdera par un mouvement à long terme ou *run* (c'est-à-dire les récepteurs sont en *état inactif*). En outre, si une bonne aptitude de consommation est obtenue, le métabolisme des bactéries sera mieux optimisé.

Nous présentons également quelques exemples de trajectoires de quelques bactéries simulées en natation comme dans la figure 4.5. Chaque bactérie répond à la présence de sources d'éléments nutritifs avec de longs *run* conjugués à de courts *tumbles*, ou ce qu'on appelle des marches aléatoires en absence de traces détectables de nutriments (c.-à-d. *état d'équilibre*).

Nous pouvons noter plusieurs angles caractéristiques formés entre deux périodes de natation longue en ligne droite (un *run*) marquée par une période de changements brusques dans l'orientation (une *tumble*) comme ça peut être noté dans la figure 4.5.

Ces angles successifs illustrent la façon dont les bactéries peuvent évoluer à partir de leurs positions initiales vers une zone privilégiée riche en éléments nutritifs.

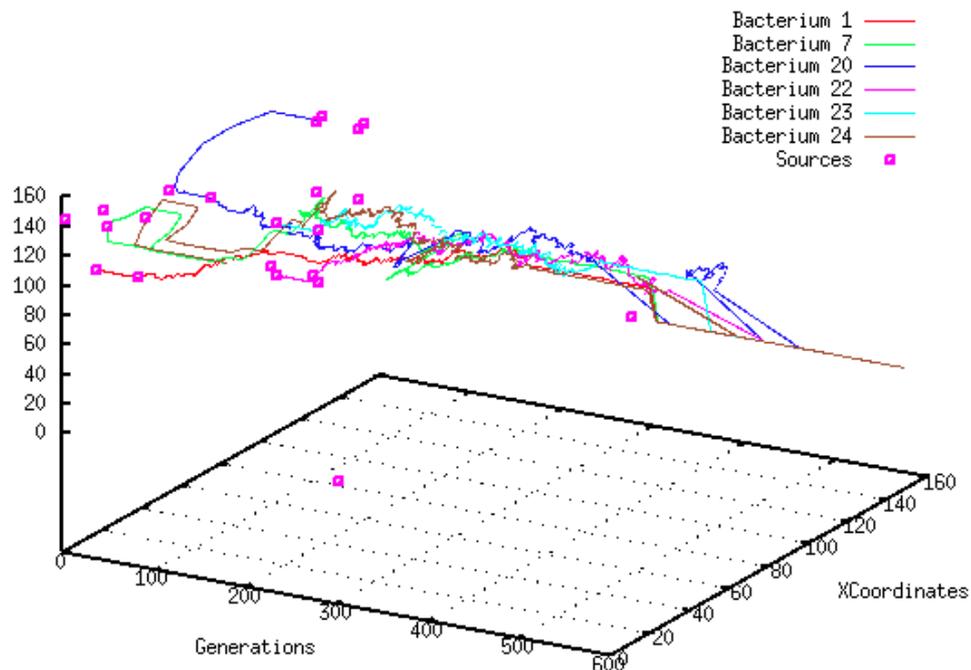


FIGURE 4.5 – Trajectoires en 2D réalisées par quelques bactéries choisies de la simulation dans les 600 générations (ou cycles). Les carrés représentent les nutriments qui sont présents au début de la simulation, ensuite après les 33 cycles. Nous avons placé certaines sources sur quelques moments de simulation choisis où les meilleures bactéries ont réagi à cet environnement.

Deux phases évolutives caractéristiques ont été observées dans ce système : au début (c.-à-d. les 20 premières) des 300 premiers cycles, les bactéries exécutent une première longue série à partir d'une source de nutriments à l'autre, mais passent leur polarisation d'oscillation de transition à une marche aléatoire lorsque toutes les ressources sont épuisées. Le même phénomène est observé dans les 300 prochains cycles.

Des résultats sur le mouvement des bactéries dans leur environnement selon les conditions définies dans cette partie de l'expérience sont présentés dans les captures d'écran (voir figure 4.6) des bactéries dans leur environnement 2D à des stades de temps différents : depuis leurs naissances à l'état initial de la simulation, ensuite après quelques générations après que l'ensemble de la population commence à grandir du fait que les bactéries se divisent après avoir consommé tous les nutriments présents dans l'environnement.

4.6.2 Résultats de Fourragement avec recyclage de la matière

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de la reproduction et de survie de bactéries qui vivent dans notre écosystème artificiel. Nous montrons qu'il est possible de simuler l'évolution de centaines de bactéries en utilisant des modèles élémentaires d'un simple organisme simulé dans un environnement 2D. Leurs capacités de reproduction et de survie dépendent des capacités de recherche de nourritures obtenues par évolution (sélection naturelle). Les simulations que nous présentons ont pour objectif de comparer deux types de métabolismes afin d'en choisir le meilleur, en l'occurrence le métabolisme le plus approprié pour la reproduction d'un écosystème artificiel.

Dans cette partie, nous utilisons le modèle de métabolisme décrit dans la section (4.4.2) représenté par la simulation déjà décrite plus haut, mais avec un recyclage de la matière. Ce modèle consiste à transformer de la matière représentée par la nourriture, la biomasse ou les déchets.

La figure (4.7) représente le taux de reproduction des bactéries dans une population pour 5000 générations avec un métabolisme autorisant le recyclage de la matière et de l'énergie. Dans ce cas, les bactéries mortes sont remplacées par des nutriments dans l'environnement qui vont servir de nourriture pour les autres bactéries vivantes dans la population évoluée. Dans cette expérience, le comportement observé présente une distribution spatio-temporelle de bactéries différente de celle présentée dans l'expérience précédente.

Sur la figure (4.7), le premier comportement que nous pouvons remarquer est une augmentation rapide de la population, le taux de reproduction s'est bien amélioré en raison des capacités définies dans le génome de chaque bactérie, qui a mieux évolué, ce comportement est aussi influencé par les concentrations des ressources de l'environnement ; à chaque fois que le nombre de sources de nutriments augmente. En raison des bactéries mortes transformées, les bactéries se nourrissent mieux et se divisent plus. Ceci se traduit par l'augmentation du nombre de bactéries sur l'intervalle (30-300) contrairement à ce qui est remarqué sur cette même période de la simulation dans la figure (4.3). A partir de la génération 2000, nous remarquons que les deux graphes des figures (4.7) et (4.3) sont similaires en taux de reproduction, hormis une petite différence pour la valeur maximale de la bactérie atteinte par division cellulaire (700 bactéries atteintes sur la figure 4.7 et 200 sur la figure 4.3).

4.6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

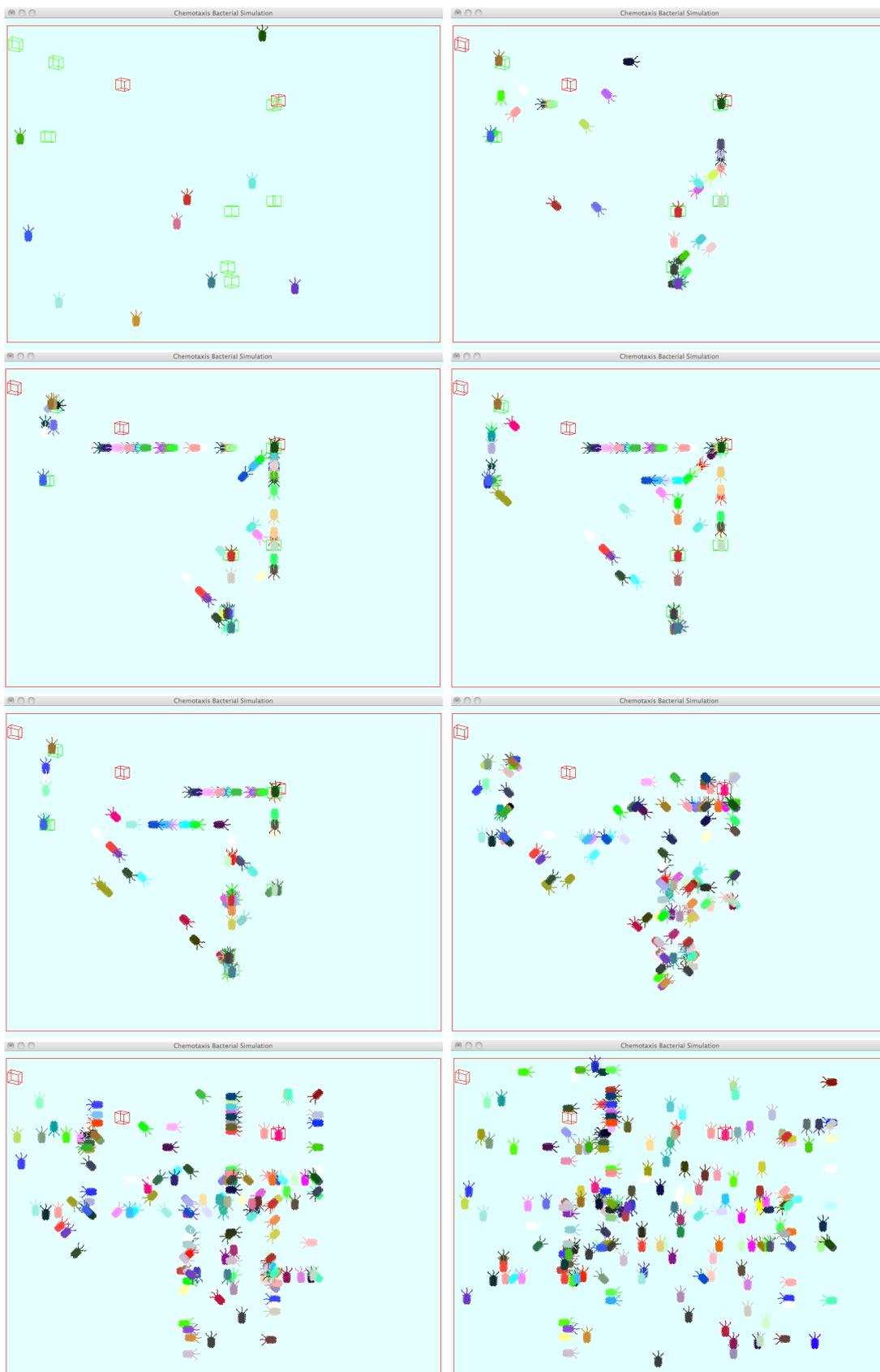


FIGURE 4.6 – Captures d'écran de la simulation de bactéries dans l'environnement 2-D sur plusieurs périodes de simulation.

4.6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La deuxième remarque que nous pouvons faire sur le graphe du taux de reproduction est qu'une variation du nombre de bactéries dans la population évolué au cours du temps est observée sur la figure (4.7) au niveau de la génération 2000 contrairement à celle de la figure (4.3) qui est mise en évidence au niveau de la génération 400. Ce retard dans la stabilisation du taux de reproduction est dû au fait que plusieurs conditions environnementales ont influé les comportements des bactéries et le plus important événement est le recyclage de la matière (autrement dit la transformation de la matière morte en des nutriments fournissant de l'énergie).

La figure 4.8 indique le niveau de l'énergie des bactéries pour 5000 générations pour un métabolisme qui recycle la matière. Les courbes indiquent le niveau d'une population de bactéries d'une simulation avec le modèle du métabolisme agissant sur ces bactéries sans matériaux de recyclage d'énergie. Les partie des courbes à droite indiquent les mêmes parcelles, mais pour une simulation avec le modèle de métabolisme approuvé.

Sur la figure 4.8, également nous observons que les ressources métabolisables sont consommées, alors que l'énergie collective de la population diminue au début de la course (comme de nouvelles cellules sont créées). Lorsque la vitesse maximale du processus de division est atteinte, l'énergie des bactéries est exponentiellement réduite, pendant les trente première générations, sachant que toutes les sources sont épuisées, tandis que de nombreuses bactéries meurent parce qu'elles n'ont pas assez d'énergie pour réaliser leurs mouvements. À l'inverse de la figure 4.4, l'énergie des bactéries est recyclée (présentée à nouveau dans l'environnement). L'énergie des bactéries se stabilise à partir de la génération 2000 jusqu'à la génération 3000 où les variations dans le niveau d'énergie causées par la division, la consommation, la mort et le recyclage. La même remarque peut être faite pour les valeurs de haut niveau de l'énergie totale de la figure 4.8, dont la valeur est 40, à l'inverse de l'autre (figure 4.4) qui est de 35.

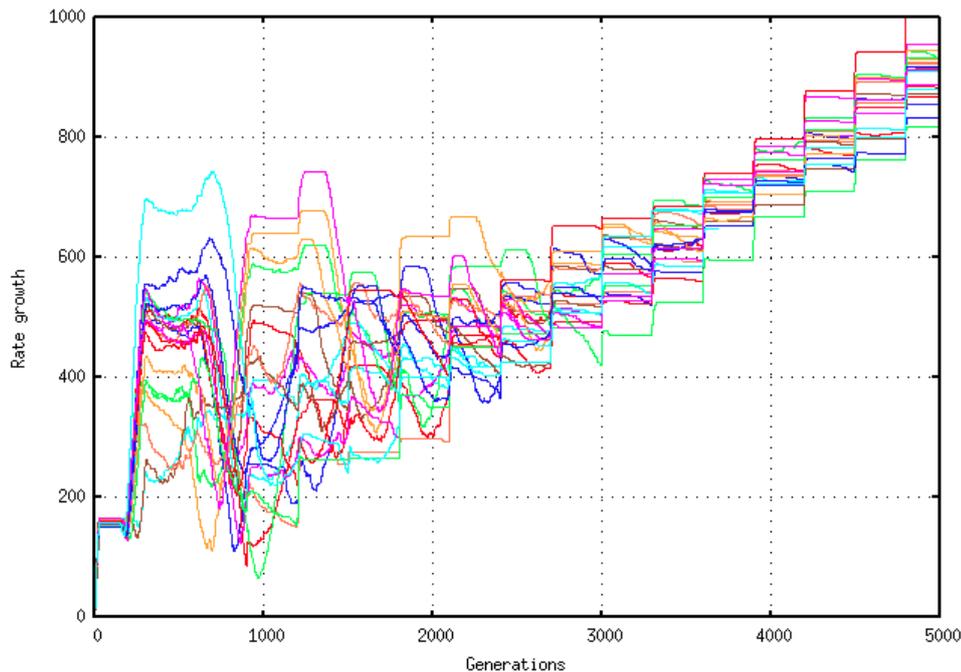


FIGURE 4.7 – Le taux de reproduction des bactéries sur 5000 générations sur le modèle de chimiotaxie bactérienne avec un métabolisme avec recyclage.

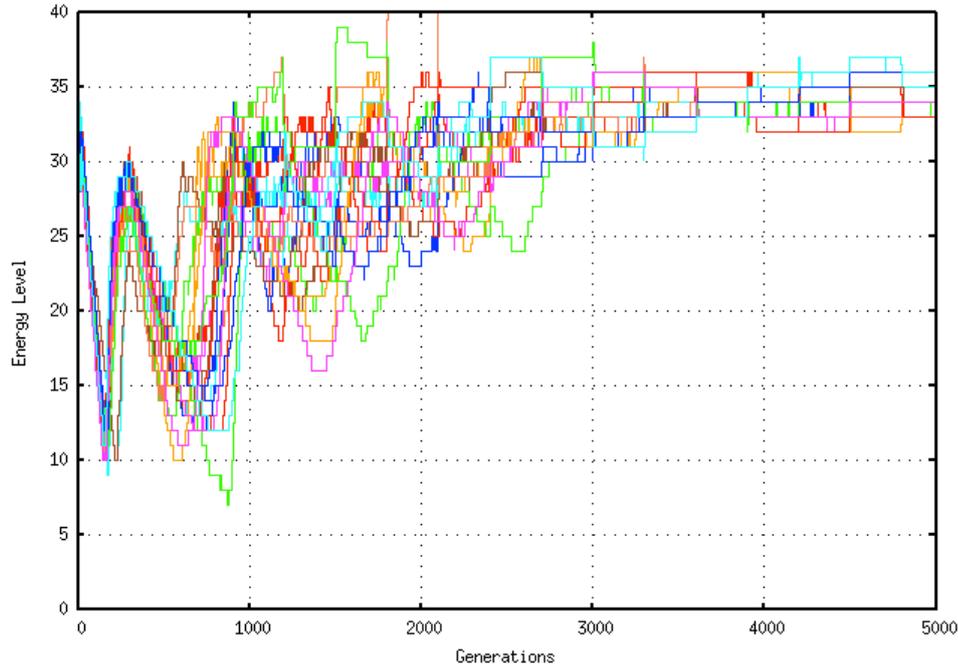


FIGURE 4.8 – Le niveau d'énergie de la population de bactéries simulés dans la deuxième expérimentation avec le modèle de métabolisme amélioré.

4.7 Discussion

Les résultats présentés ci-dessus démontrent que la simple simulation d'organismes unicellulaires dotés de mécanismes biologiques, tels que des réactions chimiques simples nous permet de modéliser des comportements émergents plus complexes au niveau de la population. Nous avons observé un taux de croissance sain (ou une augmentation dans le nombre de bactéries) pour plusieurs centaines de générations, tant que les ressources sont abondantes dans l'environnement. Nous pouvons également noter des augmentations collectives dans la durée de vie de la population parce que les bactéries font émerger des stratégies plus améliorées qui leur permettent d'utiliser moins d'énergie en mouvement, et d'optimiser leur gain d'énergie (c.-à-d. métabolisme optimisé).

Ce système est donc favorable à l'émergence (ou l'adaptation) de l'appareil sensoriel efficace pour détecter les aliments et éviter les toxines, ce qui permet aux individus de mieux éviter les situations mortelles et améliorer la reproduction, permettant à la population de se développer. Lorsque les bactéries sont en mouvement, en consommation, et en division, leur réseau de chimiotaxie est optimisé afin de contrôler leur mouvement.

La figure 4.9 explique la façon dont le réseau de chimiotaxie répond aux changements intracellulaires et environnementaux. Quatre états internes ont été isolés dans cette réponse : *Etat Stable*, *Etat Entièrement Inactif*, *Etat Adapté*, et *Etat Entièrement actif*.

Pour chacun de ces états, les concentrations de protéines ont été mesurées et comparées [248]. *L'état Active* est caractérisé par les bactéries qui exécutent une marche aléatoire et explorent l'environnement avec des valeurs initiales des paramètres de ($CheA = 0,0164$, la méthylation = 1,92, $CheY = 1,92$, et le moteur biais = 0,65), comme défini sur le tableau des paramètres de simulation (table 4.2).

4.7. DISCUSSION

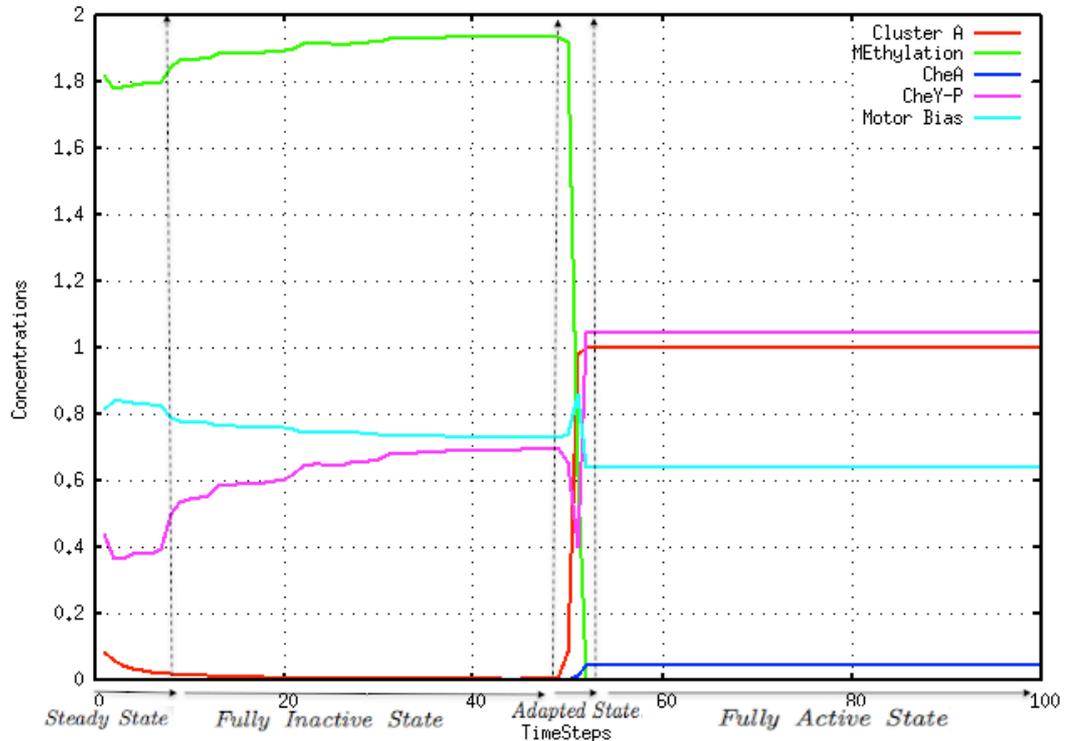


FIGURE 4.9 – Le graphe de variation des concentrations des protéines et enzymes utilisés à l’intérieur de la cellule par le processus de chimiotaxie bactérienne.

Lorsque les bactéries détectent des sources de nourriture, elles entrent dans un régime de consommation (ou un état de consommation) où les récepteurs transmembranaires perçoivent les changements de concentration des attractants et deviennent inactifs. Les attractants qui se lient aux récepteurs, inhibent l’activité d’autophosphorylation de CheA. Le CheY phosphorylée (CheY-P) par les groupes reçus de CheA, diffuse aux moteurs flagellaires et induit des changements dans la rotation du moteur, incitant la bactérie à exécuter un *run* (aller de l’avant). L’augmentation de la concentration de l’attractant bascule le récepteur vers l’état «off» (c.-à-d. *l’état entièrement inactif*), ce qui entraîne une baisse initiale rapide de l’activité de la kinase CheA (0,002), provoquant également la baisse du niveau CheY, et induisant des périodes de *run* plus longs (c.-à-d. $mb = 0,75$).

La diminution de l’activité de la kinase CheA est suivie d’une adaptation lente dépendante de l’enzyme CheR. Dans *l’état adapté*, les deux états *on* et *off* sont équiprobables, et les deux enzymes CheR et CheB travaillent simultanément pour réaliser successivement la méthylation et la déméthylation. Dans ce régime, la méthylation provoque l’augmentation de la capacité du récepteur à stimuler l’activité de la kinase CheA. Une diminution d’attractants bascule l’état du système vers l’état *on* (ou *l’état entièrement actif*) qui active l’autophosphorylation de CheA (0,047) et donc en aval la phosphorylation de CheY. La méthylation diminue également l’activité du groupe de récepteurs de la substance attractive, régulant de ce fait la liaison du ligand au groupe récepteur.

4.8 Communication entre bactéries

Les phénomènes biologiques sont souvent contrôlés par un réseau complexe de réseaux de protéines et de gènes qui constituent les voies de régulation. Un grand nombre de ces voies prennent leur avantage des procédés environnementaux et des signaux moléculaires pour réguler les activités cellulaires. Toutefois, il n'est pas toujours clair de déterminer la façon dont les systèmes biologiques sont en mesure de soutenir la propagation d'un signal précis sur une gamme dynamique suffisamment large au sein de la cellule.

Une communication entre bactéries a été mise en évidence pour la première fois pour la bactérie *Vibrio fischeri*, qui est une bactérie symbiote du poisson *Eurprymna scolopes*. Ce microorganisme peut vivre soit sous forme planctonique, c'est-à-dire libre dans les océans, soit dans un environnement confiné lors de l'association symbiotique avec *E. scolopes*. la bactérie *V. fischeri* présente la propriété de synthétiser un composé luminescent dans des conditions de forte densité cellulaire, rencontrées naturellement lorsque la bactérie est engagée dans une association symbiotique. L'expression des gènes responsables de la bioluminescence est donc liée à la densité cellulaire chez la bactérie *V. fischeri*. Le phénomène est dit « *quorum sensing* » et permet de coupler le contrôle d'un mécanisme avec la densité cellulaire bactérienne en vue d'une action concertée [83].

4.8.1 Phénomène du 'Quorum Sensing'

Le « quorum sensing (QS) » est un mécanisme de communication cellulaire par le biais duquel une population microbienne 'estime' sa densité cellulaire par production et détection de l'accumulation d'une molécule 'signal' libérée dans son environnement [15]. Le principe est qu'au fur et à mesure que le nombre de cellules d'une population bactérienne augmente, la concentration en molécules 'signal' libérées dans le milieu augmente proportionnellement. Lorsque la concentration correspondant à un seuil est atteinte, les molécules de signalisation sont re-transportées dans les cellules ou sont liées aux récepteurs de la surface cellulaire, où ils vont entamer des changements coordonnés dans l'expression des gènes.

Le système de régulation de l'expression des gènes en fonction de la densité cellulaire fait intervenir un signal qui doit être produit, diffusé et perçu par les bactéries. Le terme auto-inducteur a été utilisé pour définir ces molécules 'signal' dont la concentration est directement corrélée à la densité bactérienne [157].

Malgré les différences dans les composants de régulation et les mécanismes moléculaires, tous les systèmes de QS connus dépendent de trois principes de base :

1. Tout d'abord, les membres de la communauté produisent des auto-inducteurs, ce sont les molécules de signalisation. À une faible densité cellulaire (LCD low cell density), les auto-inducteurs diffusent à distance, et par conséquent, sont présents à des concentrations inférieures au seuil requis pour la détection. À haute densité cellulaire (HCD high cell density), la production cumulée de l'auto-inducteur conduit à une forte concentration locale, permettant la détection et la réponse (c.-à-d. la production) [111].
2. Deuxièmement, les auto-inducteurs sont détectés par des récepteurs qui existent dans le cytoplasme ou dans la membrane.
3. Troisièmement, en plus de l'activation de l'expression des gènes nécessaires à la détection des comportements de coopération, la détection des auto-inducteurs résulte

en réponse à l'activation de la production des auto-inducteurs [104, 175]. Cette anticipation de l'auto-induction favorise vraisemblablement la synchronisation de la population.

Des travaux récents ont établi que de nombreuses espèces de bactéries contrôlent leurs densités cellulaires de la population à travers l'échange de molécules de signalisation chimiques (auto-inducteurs) qui s'accumulent à l'extérieur de la cellule et déclenchent des modifications dans le comportement pour une population de forte densité. Ce phénomène est désigné comme étant le quorum de détection [83, 152]. Le Quorum sensing contrôle les processus qui incluent la bioluminescence, la virulence, la formation de biofilm, et la sporulation chez diverses espèces bactériennes. En général, le quorum sensing ne régule les processus qui sont efficaces que si une population de bactéries agit d'une manière coordonnée, mais pas lorsque les bactéries agissent comme des individus [206].

4.8.2 La simulation du Quorum Sensing

Nous présentons ici une simulation d'un système de croissance et de communication entre bactéries, commençant par les bactéries individuelles qui réalisent la croissance, la division et communiquent entre elles ainsi qu'avec l'environnement. Deux étapes sont considérées pour accomplir cela :

Etape 1 : Le réseau de chimiotaxie qui garantit le comportement de fourragement des nutriments (voir section 4.4.1)

Etape 2 : Un réseau moléculaire qui garantit la communication entre ces mêmes bactéries qui fourragent des nutriments par chimiotaxie (voir figure 4.10).

Cette communication se fait par des molécules *N-acyl-homoserine lactone* (AHL) qui sont détectées par deux récepteurs LuxR (cytoplasmique) ou LuxI (Membrane) dans la membrane de la cellule. Au début de la simulation, la densité de la population est faible, la diffusion réduit rapidement la concentration de l'auto-inducteur dans l'environnement. Après la multiplication cellulaire, la densité de la population augmente, et la concentration de l'auto-inducteur dépasse le seuil critique, et on dit que le quorum est atteint.

Les bactéries comme *E. Coli* utilisent le système de détection de quorum via des senseurs histidine kinases membranes.

Le processus de détection du quorum joue un rôle majeur dans :

- Les comportements coloniaux de populations bactériennes (ou comportement multicellulaire), en permettant des comportements, ou certaines actions entre les bactéries de même espèce en fonction de la densité de leur population ;
- Le contrôle de la densité cellulaire des populations ;
- Les modifications dans le comportement, qui sont déclenchées par les molécules lorsque le quorum est atteint ;

Ces molécules migrent d'une cellule vers une autre cellule, qui doit être proche d'elle (zone de détection, si le quorum est atteint), les bactéries se comportent en groupe (c.à.d. des communautés de bactéries sont formées), et des mécanismes de synchronisation apparaissent.

Selon [251], la bactérie *E. Coli*, après être contrôlée par le quorum sensing, exécute les fonctions suivantes : la forme cellulaire, la division cellulaire, et le Traitement de l'ADN.

Habituellement, la liaison des molécules aux récepteurs active l'activité kinase du récepteur, qui s'auto-phosphoryle, et fait passer du phosphate à un régulateur du récepteur

cytoplasmique apparenté. Le régulateur de réponse phosphorylée active la transcription du gène dans le régulons de QS. La figure 4.10 est une représentation schématique de la détection du quorum bactérien. À une population de faible densité (LCD), correspond une production à un niveau de base de molécules auto-inductrices qui consiste en une dilution rapide des signaux des auto-inducteurs dans le milieu environnemental. Pour une population de forte densité (HCD), une augmentation du nombre de bactéries se traduit par l'accumulation d'auto-inducteurs au-delà d'une concentration seuil, conduisant à l'activation des protéines régulatrices de la réponse, ce qui initie la cascade de quorum-sensing (décrite ci-dessous).

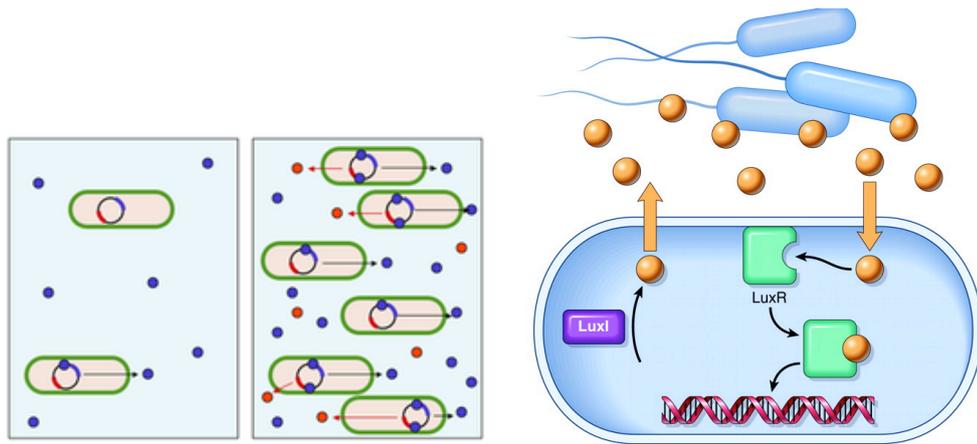


FIGURE 4.10 – Le quorum sensing entre bactéries. À gauche le fonctionnement dans LCD, et une autre dans HCD quand le quorum est atteint. À droite, le détail du fonctionnement de production et de détection des molécules AHL [185].

Afin de répondre à cet objectif de communication entre bactéries, nous avons appliqué l'algorithme 2 qui résume l'application des molécules AHL, qui sont diffusées dans l'environnement, testées, et ensuite remises à nouveau dans ces mêmes cellules bactériennes qui forment des groupes et se comportent comme un organisme multicellulaire. Avant d'atteindre une concentration seuil, les bactéries se comportent individuellement en exécutant le modèle de chimiotaxie déjà décrit plus haut, et produisent un signal de molécule avec une faible concentration. Une fois ce seuil atteint, la production du signal moléculaire augmente, tous les récepteurs sont activés et peuvent recevoir les molécules pour y répondre, ainsi le taux de reproduction augmente.

Les paramètres de simulation ainsi que les initialisations sont presque les mêmes que ceux ou celles de l'expérimentation (section 4.6.2), avec une production d'une molécule AHL dépendante de la densité cellulaire, et dans les deux cas de concentration (LCD ou HCD), sauf que l'atteinte du seuil modifie les paramètres de division ainsi que ceux liés au métabolisme. La figure 4.11 présente les résultats de reproduction effectués sur cette simulation de 1000 générations, d'où le comportement de base en présence de nutriments placés aléatoirement qui est remarqué au niveau des 300 premières générations, et une croissance rapide de la génération 0 à la génération 126. Sur toute la période, le taux de mortalité est nul, l'activité métabolique est maximale et le taux de croissance est constant.

Consécutivement, les valeurs de densité cellulaire restent constantes jusqu'à ce que de nouvelles ressources soient à nouveau disponibles, dans l'environnement, en plus des

Algorithme 2 L'algorithme du Quorum Sensing

Entrées : La concentration des nutriments, la densité cellulaire ;**Sorties** : Fréquence de Tumble, comportements synchronisés ;

initialization ;

Pour (chaque pas de temps ($t=t+dt$)) **Pour** (Chaque cellule) **Si** (LCD) // *Low cell density*

Diffuser une molécule (faible diffusion)

 Réseau chimiotactique () ; // *run or tumble* Calculer la prochaine position de la cellule ($x(t+dt)$, $y(t+dt)$) ;

Métabolisme () ;

Division () ;

Sinon // *Quorum atteint*

Augmentation de la production du signal (avec LuxI) ;

Activation des senseurs de détection des molécules AHL (LuxR) ;

Augmentation du taux de croissance ;

Augmentation du taux de métabolisme ;

Fin pour**Fin pour**

ressources obtenues des bactéries mortes des 300 premières générations. Au cours de cette phase stationnaire, la population bactérienne n'évolue plus, ainsi la population demeure stationnaire. Nous avons à noter un équilibre entre le nombre de nouvelles cellules et le nombre de cellules qui meurent. La décroissance de la population se manifeste lorsque le milieu devient fortement défavorable à la multiplication des micro-organismes et entraîne leur mort rapide. Cependant, du fait que dans notre modèle, les bactéries mortes sont considérés comme étant de nouvelles ressources, on n'a pas donc de décroissance, mais plutôt l'inverse, un nouveau taux de croissance émerge. Par la suite, nous observons chaque 300 cycles une augmentation régulière avec le même rythme de la densité cellulaire.

Pour ce qui est du comportement de groupe, le seuil du quorum peut être observé à la génération 126 quand la densité atteint presque 300 bactéries (début de la phase stationnaire). Après ceci, des comportements de groupe synchronisés sont remarqués, tel que présenté dans la figure 4.13. Les figures (4.12 et 4.13) illustrent la façon dont la densité cellulaire change en fonction de la densité des molécules de communications (voir figure 4.12). Ces captures d'écran montrent également comment des comportements de groupes apparaissent.

Sur la figure 4.12, nous pouvons remarquer clairement comment la concentration des molécules augmente proportionnellement à l'augmentation des bactéries et la façon avec laquelle elles émergent sur certaines parties de la grille, là où il y a le plus de sources de nourriture, ainsi qu'au niveau des endroits qui contiennent le plus de bactéries. Ceci explique également le fait que des groupes se forment (voir les trois premières captures). Cependant, sur les trois dernières captures, lorsque les bactéries exécutent une marche aléatoire au moment où aucune source de nourriture n'est disponible (avant l'étape de recyclage), les bactéries ainsi que les molécules sont dispersées partout dans la grille de l'environnement (pas de sources, pas de comportements organisés). Plus spécifiquement sur la figure 4.13, nous pouvons noter un suivi des comportements d'un groupe qui s'est formé et la façon dont ce groupe de bactéries se déplace dans l'environnement en cherchant

de la nourriture.

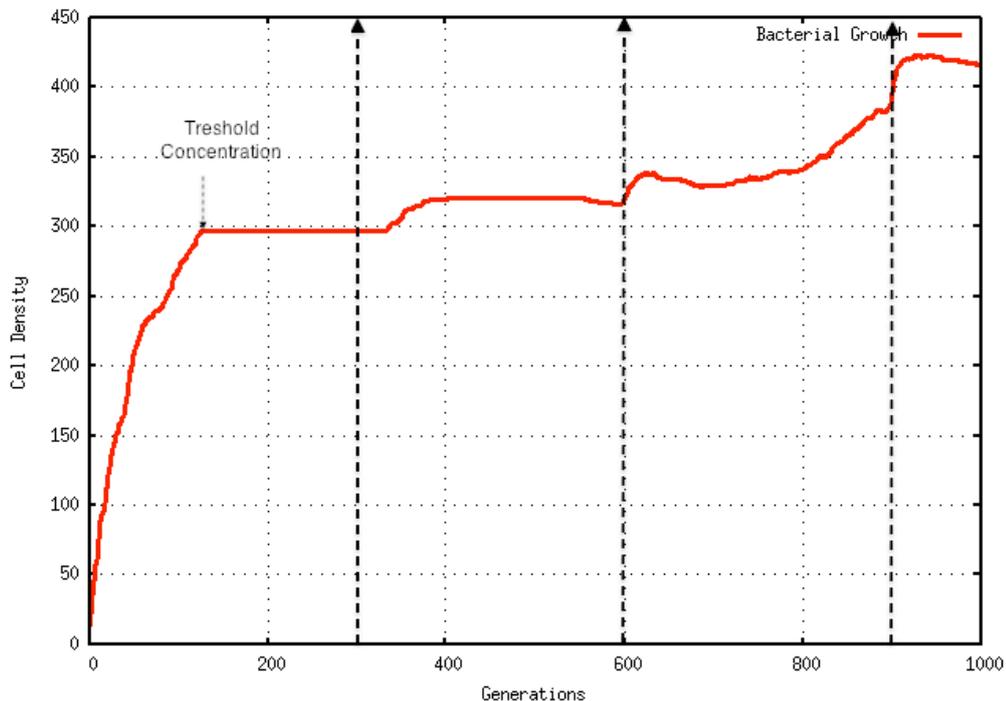


FIGURE 4.11 – Croissance bactérienne sur les 300 premières générations.

4.9 Récapitulatif des résultats obtenus

Dans ce chapitre, nous avons choisi des créatures unicellulaires pour faire évoluer leurs capacités de recherche de nourriture (fourragement) par le biais de la chimiotaxie bactérienne ainsi que leurs capacités de communiquer les une avec les autres par échange de molécules, et se reproduire afin d’édifier des communautés. Autrement dit, nous avons simulé un modèle microscopique d’une cellule individuelle afin de générer le comportement de toute une population.

Le présent modèle de chimiotaxie bactérienne permet de surmonter les problèmes de détection de ressources, il est renforcé par un modèle de métabolisme qui est responsable de la gestion de l’énergie (c’est à dire : le mouvement, la division, la survie...). Ce modèle utilise, en plus de la chimiotaxie et le métabolisme, la communication via le concept du « quorum sensing » qui a donné comme résultat l’émergence des comportements synchronisés de groupes de bactéries. Le modèle de chimiotaxie de la bactérie *E.coli* construit utilise une démarche hybride pour la simulation des voies chimiques, avec un mélange des composants algébriques, ODE, et stochastiques au lieu et à la place d’un modèle entièrement stochastique avec un algorithme évolutionnaire afin d’émerger des comportements de populations de bactéries.

Pour analyser et visualiser les comportements évolués résultants, nous avons présenté des données qui caractérisent les positions des bactéries, l’énergie, et l’état dans le cycle de reproduction cellulaire ainsi que le cycle de croissance par communication. Ces résultats montrent que les bactéries sont capables de se développer à travers le processus de

mutation.

Les résultats que nous avons présentés tout au long de ce chapitre ont cependant quelques limites présentées dans la section suivante.

4.10 Limites du modèle

Une des limites principales de ce modèle réside dans le choix du paramétrage utilisé pour modéliser les processus de chimiotaxie et de métabolisme ainsi que celui de communication chimique entre les bactéries à faire évoluer, du fait que le choix des valeurs des paramètres utilisés dans nos simulations n'ont aucune contrepartie biologique, mais seulement des valeurs choisies selon nos propres observations ou sur certains tests, reste que d'autres sont inspirés d'autres modèles.

La complexité d'un système biologique tel que celui d'une chimiotaxie bactérienne, rend le simple modèle que nous avons proposé loin d'être une abstraction d'un vrai modèle biologique, mais juste une reproduction du principe de base, et beaucoup plus d'effort sont encore nécessaires pour approcher des buts tels que celui d'une simulation exacte d'un modèle biologique dans un milieu artificiel. Prenons par exemple la partie chimiotaxie de bactéries, au niveau récepteur, il y'a plusieurs types de protéines et d'enzymes que nous n'avons pas appliqués dans notre modèle. Aussi, la phase d'adaptation dans le modèle de chimiotaxie n'est pas assez détaillée du fait que c'est cette période de l'activité des récepteurs qui sera régularisée. Nous pouvons également utiliser plusieurs moteurs de flagelles afin de mieux contrôler nos bactéries.

Pour la partie communication, nous avons appliqué une simple méthode pour estimer le nombre de bactéries dans une région afin d'en répondre par une production d'une molécule de communication, ensuite nous avons observé des comportements synchronisés de quelques groupes, mais reste que ce n'est pas assez détaillé pour visualiser l'effet de la détection du quorum sur une espèce donnée de bactérie. Par exemple, nous pouvons étudier en détail comment l'expression d'un gène peut résulter de ce phénomène de quorum sensing et comment ces changements vont affecter le comportement global des bactéries, pour voir apparaitre des biofilms, de la bioluminescence ou d'autres phénomènes.

4.10. LIMITES DU MODÈLE

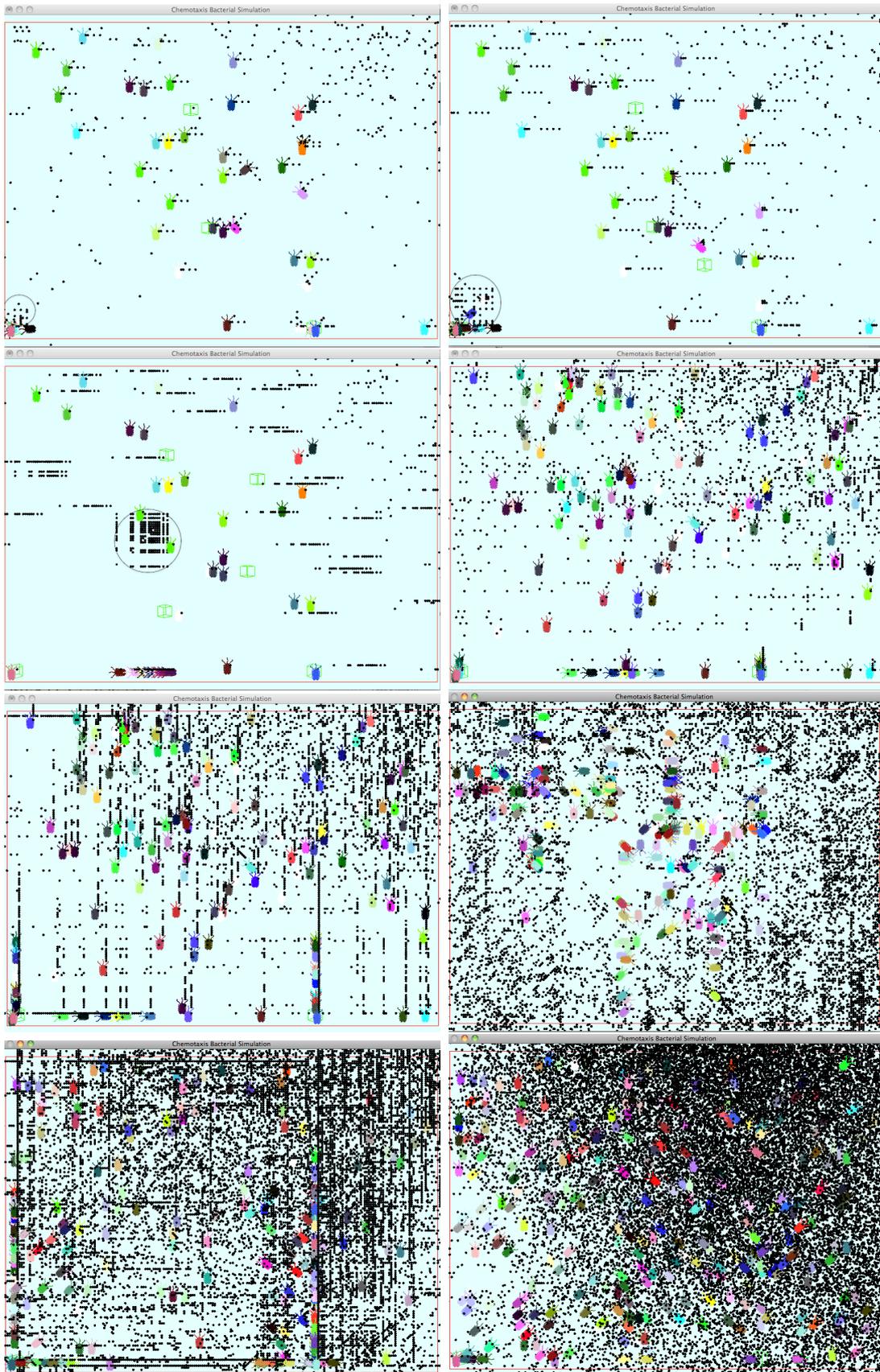


FIGURE 4.12 – Des captures d'écran sur la simulation du QS par échanges de molécules.

4.10. LIMITES DU MODÈLE

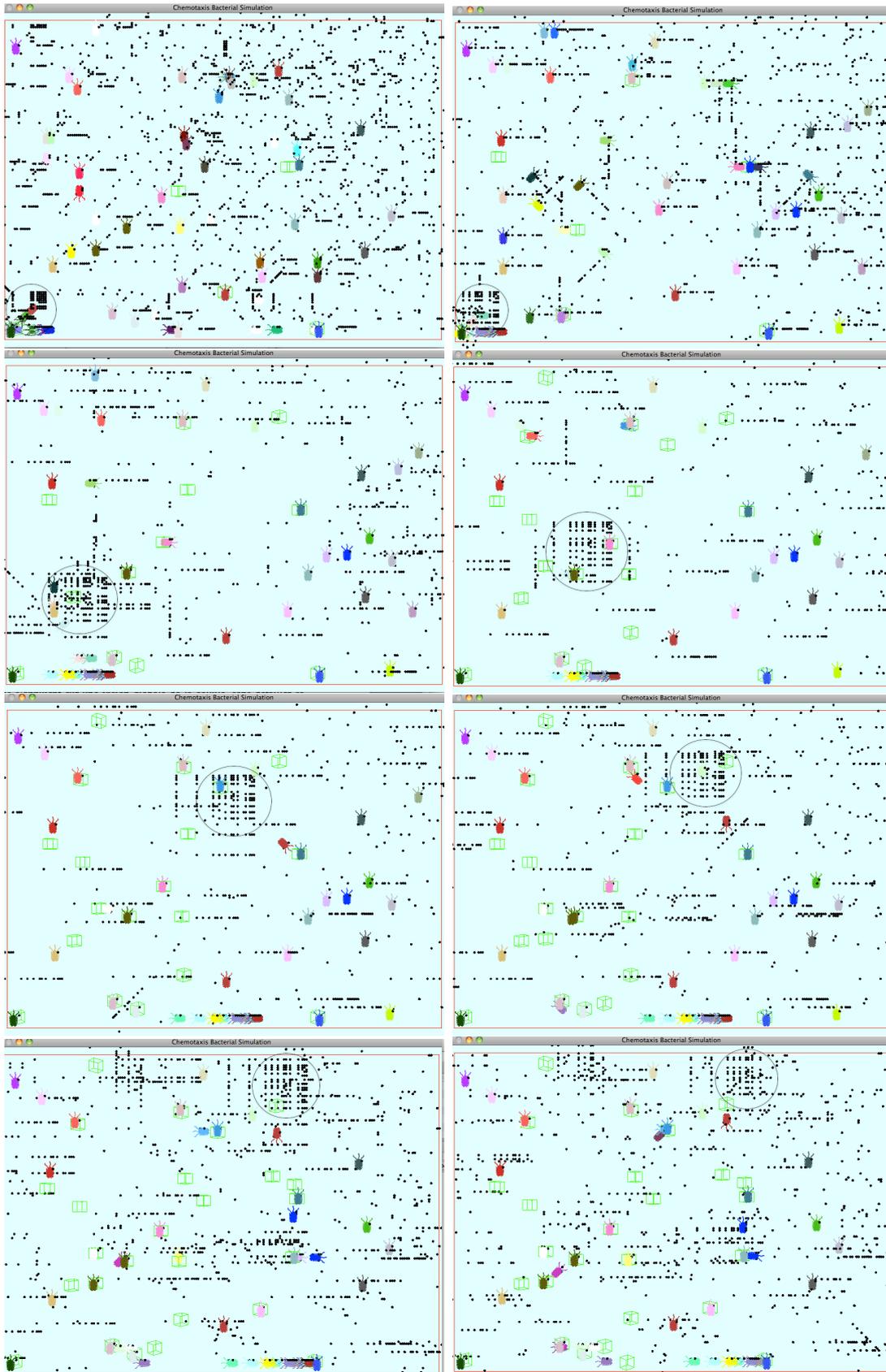


FIGURE 4.13 – Des captures d’écran sur la simulation du QS montrant quelques groupes de bactéries exécutant des comportements synchronisés.

Évolution du comportement de recherche de nourriture par des créatures artificielles dans un écosystème physiquement simulé.

5.1 Introduction

La simulation des écosystèmes artificiels a été l'une des préoccupations du domaine de la vie artificielle. Les recherches dans la vie artificielle peuvent répondre aux limites des simulations dans les autres disciplines telles que l'écologie, qui peuvent être surmontées en simulant des écosystèmes au niveau cellulaire, organique, population voire à un niveau regroupant tous ces niveaux. Nous nous sommes attelés à démontrer la faisabilité de cette approche de simulation en décrivant plusieurs organismes virtuels représentés dans un de ces niveaux. Les organismes tombent naturellement dans les niveaux trophiques, produisent de l'énergie à partir de liaisons chimiques (ou de nutriments) et transforment des éléments matériels en utilisant un processus métabolique. Les organismes virtuels peuvent interagir entre eux ainsi qu'avec leur environnement abiotique en utilisant le même modèle métabolique (ou chimique).

Le concept d'écosystème est apparu la première fois dans un article par l'écologiste Tansley [227], dont l'intérêt était l'analyse des relations entre les organismes eux-mêmes ainsi qu'avec leur environnement. Celui-ci a débattu des mérites de l'application de l'organisme à long terme pour les communautés de créatures et de leur habitat physique. Tansley a préféré se référer à cet ensemble comme un «système», ou pour être plus précis, un écosystème.

In silico, il n'y a aucune raison théorique de distinguer entre un environnement biotique et un environnement abiotique sauf si le développeur le souhaite. Cependant, il y a des raisons, souvent pratiques, pour faire une telle distinction - jusqu'à présent, il s'est avéré difficile de simuler les hiérarchies dynamiques multi-niveaux qui pourraient être reconnues comme des simulations de d'entités chimiques, d'organismes et d'écosystèmes, même si certains exemples existent [98].

Notre objectif principal est de nous inspirer des processus de la nature et de la chaîne alimentaire dans un écosystème naturel afin d'en créer un artificiel. De par le passé, il était quasi-impossible de développer des comportements de créatures artificielles [213, 203]. Aujourd'hui, cette contrainte a été levée grâce à l'utilisation d'algorithmes évolutionnaires.

La simulation de l'évolution des comportements de créatures artificielles dans des environnements physiques en trois dimensions fait l'objet d'une multitude de travaux, dont une bonne partie est basée sur les contributions de Karl Sims [213, 212].

Dans ce chapitre, nous proposons une étude du processus d'évolution au sens de la vie artificielle, qui est réalisée par un système informatique, dans le but d'allier les intérêts des chercheurs écologistes à ceux de la vie artificielle afin de simuler un écosystème virtuel. Ainsi, nous étudions l'émergence des cycles naturels de la matière et de l'énergie entre organismes de différents niveaux trophiques et de leur environnement abiotique.

5.2 Description

Le monde dans lequel les organismes artificiels évoluent est un environnement tridimensionnel physiquement simulé et représenté par un espace plat ouvert contenant des ressources énergétiques distribuées au niveau du sol et un ensemble de créatures artificielles qui tentent de chercher de la nourriture pour survivre et se reproduire par la suite.

L'évolution artificielle des comportements de fourrages alimentaires chez les organismes à pattes, que nous avons simulés, s'est avérée être une tâche difficile d'autant plus que ces organismes doivent reproduire des mouvements de locomotion pour rechercher des sources de nourritures (ou d'autres créatures) qui constitue leur but de survie. Ces organismes peuvent effectuer ces tâches dans l'environnement de simulation grâce à leurs capacités sensori-motrices qui sont contrôlées par un réseau de neurones. Les contrôleurs de ces organismes prennent leurs entrées à partir d'un ensemble de senseurs qui détectent les sources de nourritures existantes dans leur milieu ou représentées par autres créatures. Par la suite, ils doivent fournir en sortie les paramètres permettant de contrôler dynamiquement les 6 degrés de liberté des pattes de la créature tout au long du temps de simulation.

Un algorithme génétique avec un réseau de neurones artificiel a été mis en œuvre afin de garantir certains de ces comportements comme la recherche de nutriments, la prédation et l'évasion. Le processus évolutif utilise les propriétés physiques des créatures artificielles et une fonction de fitness multi-objective définie d'une façon externe afin de faire émerger les comportements intelligents de ces créatures artificielles.

Des expérimentations ont été effectuées pour développer des créatures artificielles possédant des capacités de locomotion qu'elles exploitent pour tenter d'obtenir au minimum une des sources alimentaires présentes sur sa trajectoire, ou pour attraper une autre créature dite proie, qui elle aussi à son tour doit essayer de lui échapper pour éviter la mort. Les meilleures créatures évoluées, que nous avons pu reproduire, sont capables d'atteindre des sources alimentaires multiples pendant une durée de la simulation. Et les créatures prédatrices peuvent atteindre les proie qu'elles visionnent, et certaines des créatures proies ont aussi les capacités de fuir leurs prédateurs.

Une créature artificielle est sélectivement récompensée lorsqu'elle consomme le nutriment qu'elle récupère sur sa trajectoire, son niveau d'énergie se voit alors incrémenté. La valeur de l'énergie obtenue à partir de la consommation des nutriments peut diminuer d'une valeur en fonction du coût du mouvement. Ce modèle métabolique entraîne la créature à stabiliser sa consommation d'énergie et atteindre le plus de sources d'énergie possible pendant sa durée de vie.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit :

- Nous commençons par décrire le modèle de créature artificielle que nous avons simulé en utilisant la physique newtonienne, ce même modèle étant utilisé dans toutes les expérimentations décrites dans ce chapitre. Ensuite, nous montrons de quelle façon notre réseau de neurones récurrent peut contrôler les mouvements de la créature. Ce réseau est par la suite optimisé par un algorithme génétique afin de permettre l'émergence de comportements plus significatifs compte tenu du type d'environnement (écosystème).
- Dans la section des expérimentations, deux expériences sont présentées. Dans un premier temps, pour la première expérience, un comportement de recherche de nourriture est réalisé. Dans une seconde étape, et pour un problème plus complexe, un comportement de poursuite et d'évasion est réalisé dans le même environnement. Nous terminons par une discussion sur les résultats obtenus à partir des expériences des deux comportements obtenus par évolution.

5.3 Le Modèle de la Créature Artificielle

Dans les expériences entreprises dans le cadre de notre travail, nous avons prévu de réaliser des études phylogénétiques de locomotions adaptatives dans le but d'analyser l'adaptation de comportements intelligents selon l'environnement. Dans cette partie, nous avons essayé de prédire quels paramètres morphologiques des créatures peuvent favoriser la découverte de l'évolution du comportement adaptatif. Pour ce faire, nous devons prédire l'interaction entre la morphologie et le contrôleur dans le processus de recherche des comportements adaptatifs. Selon des études précédentes [35], on a pu mettre en évidence une corrélation entre la symétrie morphologique et l'efficacité de locomotion dans les agents simulés. En faisant évoluer les morphologies et les structures de contrôle des agents simulés, et ce, en utilisant un algorithme génétique, on a découvert que les agents ayant un plus haut degré de symétrie bilatérale ont tendance à présenter une plus grande efficacité que les agents de locomotion présentant moins de symétrie bilatérale.

De ce fait, la contrainte de symétrie morphologique est importante pour assurer plus d'efficacité dans les mouvements de locomotions obtenus. Une autre contrainte garantissant l'objectif d'évolution d'un comportement adaptatif est celle de la complexité et du nombre de degrés de liberté de la créature choisie. Selon nos travaux antérieurs [163], nous avons pu faire évoluer des contrôleurs permettant à un robot humanoïde ayant 15 DOF d'acquérir par émergence des capacités de locomotion dans un environnement plat. En nous basant sur les résultats obtenus avec notre humanoïde, nous avons développé une forme plus simple possédant 6 DOF et dont toutes les parties du corps sont en contact avec le sol.

Ainsi, nous définissons une créature artificielle comme un ensemble d'éléments tridimensionnels rigides qui sont reliés ensemble à l'aide de joints et d'actionneurs. Le modèle cinématique est ensuite généré à partir des données géométriques de la créature artificielle (longueurs des liaisons, type et position des articulations, etc.). Nous avons employé un moteur physique : en l'occurrence, le moteur 'Open Dynamic Engine' (ODE) (<http://ode.org/>) que nous avons considéré comme plate-forme de simulation pour la créature artificielle. En effet, ODE est une bibliothèque libre, de qualité industrielle, utilisée dans la simulation dynamique des corps rigides articulés. Il est rapide, flexible et robuste et intègre la gestion de la détection de collisions. Par conséquent, ODE est adapté à une simulation réaliste de la physique de la créature simulée toute entière.

Pour ce qui est des primitives géométriques utilisées pour construire notre modèle de créature artificielle, nous avons évité les cylindres, même s'ils permettent d'obtenir de meilleures performances lors des calculs des interpénétrations ; ils présentent l'inconvénient de produire des morphologies peu stables en comparaison avec les parallélépipèdes rectangles. En effet, lors d'une collision avec un plan, un parallélépipède rectangle offre généralement plus de points d'appui qu'un cylindre. Ainsi une morphologie composée de parallélépipèdes rectangles permet une plus grande stabilité [123]. La figure 5.1 montre le modèle de créature artificielle que nous avons adopté. Il se compose de trois boîtes rectangulaires avec deux articulations de type *Ball and Socket* qui représente une articulation à trois degrés de liberté. Les valeurs des paramètres utilisés dans cette créature artificielle sont présentées dans la table 5.1.

Le modèle de créature artificielle présentée dans ce document est pourvu de deux capteurs alimentaires (ou des détecteurs de sources de nourritures). Ces deux capteurs sont utilisés comme la seule information sur les sources de nourriture présentes dans l'environnement. Nous utilisons le réseau de neurones récurrent en tant que contrôleur des mouvements de cette créature artificielle (pour une locomotion). Un algorithme génétique est ensuite utilisé pour faire évoluer les mouvements de la créature vers des comportements plus complexes (recherche de sources de nourriture). Les actionneurs sont contrôlés par les sorties du réseau de neurones.

Nous utilisons un modèle physique simulant une créature articulée qui incarne les relations non linéaires entre les forces et les moments agissant sur chaque jointure et les appendices (jambes de la créature) etc., ainsi que la position, la vitesse et l'accélération angulaires de chaque angle des articulations.

En plus des données géométriques, un modèle physique réaliste nécessite certaines données cinématiques et quelques propriétés physiques telles que la masse, le centre de gravité et la matrice d'inertie, pour chaque lien et jointure, et le max/min des forces de torsion des moteurs ainsi que les vitesses angulaires qui sont difficiles à reproduire. Pour simuler l'interaction avec l'environnement, la détection et le traitement des collisions ainsi que des modèles appropriés de contacts des jambes de la créature avec le sol sont nécessaires. Dans le cadre de cette simulation, nous avons choisi d'utiliser le simulateur Open Source *Open Dynamics Engine* (ODE), la bibliothèque qui peut gérer la détection de collisions pour plusieurs primitives géométriques.

L'environnement où la créature artificielle est simulée consiste en un espace tridimensionnel. Celui-ci est physiquement simulé et des sources d'énergie y sont placées pour être captées et consommées par les créatures afin de les transformer en énergie vitale.

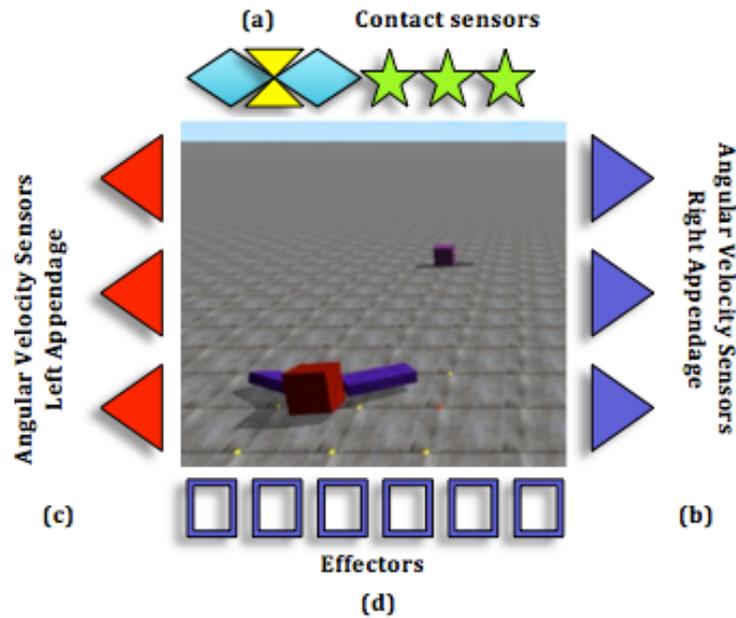


FIGURE 5.1 – Un modèle simple 3-D de la Créature artificielle utilisée dans notre simulation, avec un torse et deux jambes. Ce modèle comporte (a) deux capteurs d'alimentation, un capteur de direction et trois capteurs de contact pour chaque corps rigide. Les appendices (les jambes) sont équipés de capteurs qui y sont attachés (b) trois capteurs de vitesse angulaire sur la jambe droite, et (c) trois capteurs de vitesse angulaire sur celle de gauche. Il a également (d) six effecteurs.

Partie du Corps	Géométrie	Dimensions (m)
Torse	Parallélépipède	$0.50 \times 0.50 \times 0.50$
Jambe Droite	Parallélépipède	$0.90 \times 0.40 \times 0.15$
Jambe Gauche	Parallélépipède	$0.90 \times 0.40 \times 0.15$

TABLE 5.1 – Les paramètres du corps 3D de la créature simulée.

5.4 Le Contrôleur (cerveau) de la Créature Artificielle

Ici, nous définissons des expérimentations pour faire évoluer des comportements de fourragement dans un écosystème simulé et ce, afin de contrôler les comportements des créatures artificielles qui vivent dans cet écosystème. Nous avons exploité la façon dont l'évolution artificielle utilise les modalités sensorielles mises à sa disposition pour produire de tels comportements. Afin d'obtenir une dynamique intéressante par évolution, nous utilisons d'abord des réseaux de neurones artificiels afin de produire des comportements de base (c.-à-d. la locomotion en avant « forward locomotion ») en utilisant des modalités sensorielles distinctes de celles qui animent les comportements de base.

Le réseau de neurones artificiel récurrent (RNN) [91] est utilisé dans ce travail comme un modèle de cerveau qui est bien connu. Il se compose d'un ensemble de neurones (ou unités) et un ensemble de synapses (ou arcs), y compris l'auto-couplage des neurones individuels. La créature artificielle présentée dans notre document utilise le réseau de

neurones récurrent d'Elman [73] pour sa plausibilité biologique et ses puissantes capacités de mémorisation.

La topologie de ce réseau est organisée en 4 couches : une couche d'entrée, une couche cachée, une couche de sortie et une couche contexte. Le nombre de neurones contenus dans la couche d'entrée et de sortie dépend de la morphologie de la créature artificielle simulée (par exemple le nombre de capteurs et actionneurs). On attribue un poids à chaque connexion inter-neurone dans notre RNN (voir la figure 5.2). Ces poids seront les valeurs à optimiser par la suite par l'algorithme génétique afin de trouver la meilleure configuration possible de ce réseau et qui traduit les comportements les plus appropriés de la créature relativement à son environnement et à sa morphologie.

Le réseau RNN peut avoir un fonctionnement en temps discret tout comme les réseaux de retour en avant (feed-forward), ou un fonctionnement en temps continu. La raison d'un tel choix réside dans le fait que les RNNs utilisent la notion de temps et qu'ils sont plus puissants en terme de calcul. Dans un RNN, on utilise un simple modèle de neurones, où le comportement dynamique du i^{th} noeud du réseau est régi par l'équation 5.1.

$$\tau_i + \gamma_i = \sigma(\beta_i + \sum \omega_{i\varphi} \sum \gamma_i + \sum \omega_{i\varphi}^I I\varphi). i = 1, 2, \dots, \nu \quad (5.1)$$

Où ν est le nombre de neurones dans le réseau, τ_i sont des constantes de temps, γ_i est la sortie (activité) du noeud φ , $\omega_{i\varphi}$ est le poids (synaptique) qui connecte le noeud ν au noeud i , $\omega_{i\varphi}^I$ est le poids de la connexion d'un noeud d'entrée ν au noeud i , $I\varphi$ est le ν^{th} d'entrée externe au noeud i , et β_i est le terme de polarisation qui détermine la sortie du neurone en absence d'entrées. $\sigma()$ est une fonction sigmoïde dont le but principal est de restreindre l'activité des neurones sur une plage donnée. Les couches contexte et de sortie, cachées du RNN utilisent tous la même fonction d'activation sigmoïde bipolaire (voir l'équation 5.2).

$$\sigma(c) = 2/(1 + e^{-ac}) - 1. \quad (5.2)$$

L'avantage majeur du réseau RNN est que les réseaux à rétroaction (ou *feed forward*) utilisent le concept de *mémoire*. L'utilisation des connexions de retour en arrière (ou de *feedback*) permettent au réseau RNN d'avoir une capacité de *mémorisation* relativement aux événements passés.

5.4.1 Senseurs et Effecteurs

La créature artificielle simulée utilise un ensemble de capteurs pour recueillir des données de l'environnement lui permettant de nourrir le réseau RNN. Les capteurs qui surveillent l'état interne de la créature artificielle, tels que les angles des articulations sont appelés capteurs proprioceptifs. Dans ce cadre, les angles courants des jointures du pas de temps précédent de la simulation sont utilisés par le contrôleur évolué pour calculer la prochaine série de signaux du moteur pour la créature artificielle. La simulation d'une créature artificielle dans un environnement réaliste nécessite probablement des boucles de rétroaction entre le système de contrôle des créatures artificielles et leurs corps, ainsi qu'entre le système de contrôle et l'environnement. L'ensemble des capteurs externes permet de lier la créature à son environnement. Ces capteurs peuvent mesurer des valeurs telles que l'accélération de la créature par rapport à un cadre fixe de coordonnées, les forces externes appliquées aux organes, etc.

En fait, cette créature artificielle possède :

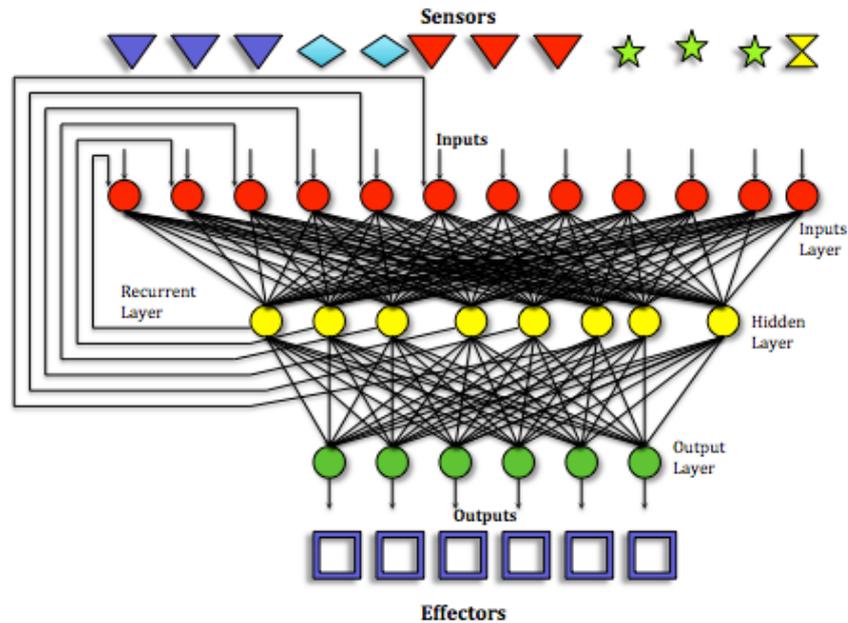


FIGURE 5.2 – La structure du réseau de neurones RNN. Il consiste en 4 niveaux : niveau entrée (avec 12 neurones), niveau caché (avec 8 neurones), niveau de sortie (avec 6 neurones), et le niveau contexte (avec 6 neurones). Il y a des arcs d'interconnexion avec des poids. Le temps de réponse de ce réseau consiste en 5 pas de simulation.

- Deux capteurs alimentaires au torse, ceux qui reviennent à l'angle et la distance entre la source de nourriture visible et la créature (dans notre expérience, à un moment (t) la créature ne voit qu'une seule source de nourriture), le premier capteur est celui de l'angle entre le vecteur qui provient du centre de gravité de la créature et le vecteur de l'avant de la source de nourriture (le cube qui la représente), le second capteur de retour de la distance entre la position du capteur et la position de la source de nourriture. Et pour l'expérimentation de poursuite et d'évasion, nous avons opéré différemment (voir section 5.8.1)
- Trois capteurs de contact ; un pour chaque partie du corps. Les capteurs de contact indiquent si un corps est en contact avec le plan de masse (le sol) ;
- Les jointures *Ball and Socket* contiennent des capteurs de vitesse angulaire qui alimentent le réseau RNN par le taux de variation angulaire.
- Enfin, un capteur de direction qui sert au réseau RNN comme une boussole virtuelle.

Nous contrôlons l'ensemble des actionneurs mis en oeuvre avec la créature artificielle qui sont trois actionneurs dans chaque appendice (jambe) de la créature artificielle. Au total, nous avons 12 capteurs et 6 actionneurs.

Dans un système de contrôle, tel que celui utilisé par la créature artificielle de type fourrageur simulée ici, spécifier les sorties adéquates pour chaque combinaison possible d'entrée et son état est pratiquement impossible. Dans ces situations, le comportement optimal doit être appris par un processus d'exploration. Les algorithmes génétiques peuvent être utilisés comme un processus d'optimisation pour faire évoluer des réseaux de neurones qui s'avèrent être des solutions robustes à des tâches difficiles d'apprentissage virtuel du monde, sans avoir besoin d'informations supplémentaires ou d'une aide d'un agent externe qui peut diriger le processus.

5.5 Le Flux d'énergie

L'énergie métabolique totale est une mesure de l'énergie métabolique interne utilisée par la créature pour produire la totalité de sa séquence de mouvements. Cette énergie peut être calculée ici comme la somme de toutes les forces utilisées par chaque articulation. Cela nous donne une mesure de l'efficacité en matière de consommation d'énergie par rapport à la distance parcourue et nous permet de comparer concrètement la consommation d'énergie des agents ayant des valeurs de fitness identiques.

Comme indiqué précédemment, nous utilisons, dans notre expérience, l'énergie métabolique (ou le taux de consommation d'énergie) comme l'une des mesures visant à sélectionner les individus dans le processus d'évolution. Ce concept n'est pas utilisé pour trouver un niveau seuil de survie (qui est réalisé par une sélection naturelle comme c'était le cas dans notre premier modèle de bactéries). Il est, par contre, utilisé pour trouver les meilleures créatures qui peuvent atteindre un grand nombre de sources de nourriture (ou pour attraper leur proie) en minimisant la perte d'énergie dévolue au déplacement.

Le bilan énergétique d'une créature est influencé par les propriétés de son corps et de son comportement. À chaque pas de temps, une certaine quantité d'énergie est soustraite de l'énergie de vie de la créature. E_i décrit le niveau d'énergie métabolique d'une créature artificielle. À leur naissance toutes les créatures dans l'écosystème virtuel ont la même valeur initiale. Le niveau d'énergie diminue tous les cinq pas de temps (temps de réponse du réseau RNN) d'une valeur correspondant au coût du mouvement. Cette valeur est mesurée par des couples cumulés générés par des actionneurs.

Afin d'augmenter le niveau d'énergie pour éviter la mort, la créature artificielle doit consommer de la nourriture (ou consommer une proie) qui est placée dans l'écosystème virtuel. Une créature artificielle avec une énergie égale à zéro meurt (elle s'arrête de se mouvoir parce qu'elle n'a pas plus d'énergie à utiliser par ses actionneurs). Après l'expiration de sa durée de vie, elle sera retirée de la population. Chaque source de nourriture fournit la même quantité d'énergie. Une fois qu'une créature a atteint une des sources de nourriture (ou une proie pour les prédateurs) existantes dans l'environnement (une collision physique est réalisée), et ainsi la quantité de l'énergie de cette source (ou proie) sera transférée à la créature.

5.6 L'évolution (Algorithme Génétique)

Le concept d'évolution est intégré dans notre modèle par le biais de l'utilisation d'une des techniques évolutionnaires les plus efficaces et les plus utilisées dans de telles sortes d'études. Un algorithme génétique est utilisé afin d'optimiser les poids du réseau de neurones pour qu'il réponde avec des sorties selon les conditions constatées. Ce processus devrait conduire la créature vers des comportements de locomotion plus adéquats et avec une vitesse bien améliorée, et conduire la créature vers le meilleur comportement de recherche de nourritures (c.-à-d. fourragement ou celui de poursuite et évasion), qui est assuré par une fonction de fitness définie d'une façon externe.

Nous utilisons un algorithme génétique (AG) avec un codage numérique réel. L'AG optimise les poids d'un réseau de neurones pour acquérir des comportements adaptatifs de la créature artificielle simulée. Les poids sont stockés dans un chromosome artificiel qui peut subir différentes modifications (croisement et mutation). La figure 5.3 illustre la structure du chromosome utilisé.

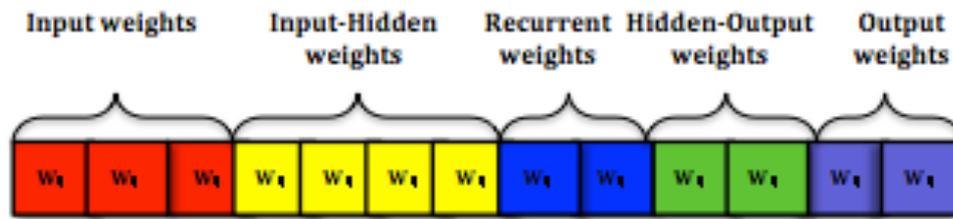


FIGURE 5.3 – La structure du Génome. Ce génome encode les poids d'un réseau de neurones récurrent, il a cinq régions, qui présentent chacun une des interconnexions entre les quatre couches du réseau. Les poids enregistrés dans ce génome sont organisés comme suit : Poids d'entrée, poids d'Entrée-Cachée, Récurrente, Caché-Sortie et le poids de Sortie.

5.6.1 Le Génome

Le génome est considéré comme une représentation de chaînes de nombres réels. Ce génome est lié d'une façon indirecte à la morphologie de la créature simulée. Chaque sous-ensemble de la chaîne des nombres réels mappe ou représente les interconnexions d'une des couches du réseau de neurones appliqué pour le contrôle de la créature. Il est à noter que le premier sous-ensemble (les poids de la couche d'entrées) est celui des informations fournies par les senseurs utilisés pour le contrôle de la locomotion de la créature d'une part (les senseurs de contact, des vitesses angulaires au niveau des jointures et des capteurs de direction), et de la détection des sources de nourritures que la créature doit obtenir (capteurs angulaires), d'autre part.

Le phénotype d'un agent est construit à partir de son génotype de la même manière qu'une tête de lecture se déplace linéairement le long du génome. Il traduit les valeurs lues en des angles formés par la créature et des forces appliquées fournissant des mouvements, qui ne seront plus contrôlés une fois que le processus d'évolution ait réussi à converger vers les solutions du problème.

L'algorithme est basé sur l'évolution d'une population de 100 génotypes, qui sont générés aléatoirement. Cette population de génotypes encode les poids des connexions de 100 contrôleurs de neurones. Les pistes d'évolution sont explorées en utilisant un génome de longueur fixe qui se compose de 638 gènes, avec 1 gène représentant un poids du RNN. Le nombre de connexions dans un réseau de neurones correspond au nombre de gènes dans le chromosome; un nombre représenté en virgule flottante représente chaque gène. Les paramètres utilisés dans cet algorithme génétique sont illustrés par la table suivante 5.2.

En raison du grand effet des tâches de recherche de nourriture, de la poursuite d'une proie et de l'évasion d'un prédateur pour le transfert d'énergie et de matière dans l'écosystème artificiel, nous avons effectués une série d'expérimentations, dont certains de leurs résultats préliminaires obtenues sont présentés par la suite, qui ont le rôle de faire évoluer les comportements de recherche de nourriture (ou fourragement), d'une part, et de poursuite et évasion d'une autre part.

Les paramètres	Valeur
Taille du Chromosome	638
Génotype	W_{ij} (Poids du RNN)
Phénotype	Distance, Energie
Taille de population	100
Le taux de croisement	70%
Le taux de mutation	1%
Elitisme	20%
Pas de Simulation	1000

TABLE 5.2 – Les paramètres de l’algorithme génétique utilisé dans ce modèle.

5.7 Expérimentation 1 : Recherche de nourriture

Nous avons réalisé des expériences pour analyser la façon dont les créatures artificielles simulées peuvent acquérir des comportements de recherche de nourritures en se dirigeant vers des sources placées dans l’environnement virtuel, ensuite nous avons analysé les capacités de marche ainsi acquises et ceci tout au long du comportement de recherche de nourriture qui est le comportement de base dans un écosystème artificiel.

Dans cette partie, nous présentons deux configurations expérimentales :

- (a) **Le cas où une source de nourriture unique est présente dans l’environnement** : la fonction de fitness est donnée par la mesure du niveau d’énergie d’une créature artificielle et la distance parcourue à la fin de sa durée de vie (fin d’une évaluation).
- (b) **Plus d’une source de nourriture** : chaque source de nourriture possède une capacité d’énergie maximale donnée qui définit la quantité initiale de son énergie. Si une créature artificielle est en contact avec une source de nourriture, une certaine quantité d’énergie est transférée de la source à la créature artificielle qui est ainsi consommée. Les meilleures créatures sont celles qui ont le plus d’énergie, car après avoir conquis une source de nourriture, elles peuvent en conquérir d’autres.

5.7.1 Conditions expérimentales

L’environnement de simulation est un espace 3D ouvert, continu, et sans obstacles. Cet environnement contient deux types d’objets : des créatures virtuelles et des sources de nourriture. Quand une créature virtuelle saisit une source de nourriture, son niveau d’énergie est incrémenté d’une certaine quantité. Toutes les sources de nourritures ont la même taille et la même quantité d’énergie. La figure 5.4 présente une capture d’écran de l’état initial et illustre l’environnement de simulation avec les objets qu’il contient.

Initialement, 100 créatures (individus) sont plongées dans le simulateur avec une source de nourriture pour chaque créature. Dans une première étape, après avoir appris à marcher, la créature doit évoluer pour atteindre la source de nourriture. Dans un deuxième temps, nous avons mis en place un environnement avec des sources de nourriture multiples pour chaque créature. Chaque créature attrape sa première source de nourriture (comme dans la première expérience) et met à jour ses informations sensorielles pour détecter la prochaine source de nourriture.

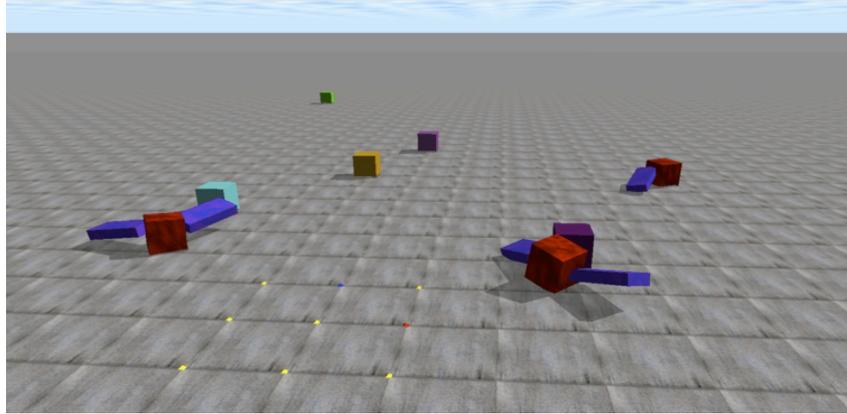


FIGURE 5.4 – Capture d’écran de l’environnement de simulation graphique qui présente les créatures artificielles et certaines sources de nourriture.

L’environnement dans lequel se produit l’évolution est extrêmement important pour les résultats définitifs. L’environnement simulé impose des contraintes similaires sur la créature virtuelle identiques à celles qu’un environnement naturel le ferait sur une véritable créature de proportion semblable. Différents paramètres ont été utilisés dans notre modèle de créature artificielle, le tableau 5.3 résume l’effet de certains paramètres qui sont importants pour la génération d’un mouvement réaliste.

Pour appliquer les aspects d’exploitation et d’exploration, nous avons introduit des changements dans nos simulations, qui sont comme suit :

- (a) La capacité d’exploration est la capacité d’une méthode à explorer efficacement l’espace d’état. Cela se fait en affectant un changement dans le pourcentage de l’opérateur de mutation (0,8 %, 1,2 % et 1,4 %).

Les paramètres utilisés par l’AG dans les deux expériences sont les mêmes (comme présenté dans le tableau 5.2).

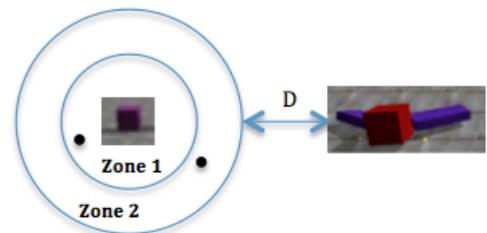
5.7.2 Paramètres d’évolution

Nous avons utilisé une population de 100 génomes du contrôleur ayant subi un processus d’évolution à travers 1700 générations en utilisant un protocole de sélection spécifique combinée à une méthode de sélection élitiste. Le rang entre deux créatures peut se résumer comme suit :

```

Begin
if ( $nb_A > nb_B$ ) than A is selected ;
else if (A in Zone 1) and (B in Zone 2) than
A is selected ;
else if (A in Zone 2) and (B in Zone 1) than
B is selected ;
if ( $E_A > E_B$ ) A is selected ;
End.

```



Où nb_A et nb_B représentent respectivement le nombre de sources de nourriture consommées par la créature A et B, la zone 1 est un cercle d’environ un mètre de la source de

Paramètres	Effets
Dimensions et masse des corps et COM (Centre de masse) de compensation	Influer sur les forces maximales applicables aux articulations
Les erreurs du moteur physique causés par des grandes forces et couples	Impliquer et violation des limites du mouvement d'une jointure, et encourir ainsi, les mouvements irréalistes
Forces applicables et des masses	affectent la réaction du corps pendant le mouvement
Utilisation de très peu de valeurs peuvent nuire l'agent d'atteindre son objectif	La raison est que le corps articulé n'a pas assez de degrés de liberté pour marcher
Plusieurs spécifications du sol	Peut affecter le mouvement de la créature

TABLE 5.3 – Paramètres physiques utilisés par le moteur dynamique.

nourriture vue par la créature et la zone 2 est d'environ 2 mètres. E_A and E_B est les niveaux d'énergie de chaque créature obtenus à la fin de la simulation.

Le protocole de sélection est utilisé pour choisir entre deux créatures A et B. Ce choix repose sur trois critères : si une créature a obtenu plus de sources de nourriture, elle sera choisie. Si les deux créatures artificielles n'ont pas encore obtenu de sources de nourriture, alors que le choix devient basé sur la distance parcourue, il est appliqué en testant l'espace (zone) où se trouve la créature, et la créature choisie est celle ayant la position la plus proche de la zone où se trouve la source de nourriture (par exemple de la zone 1). Le dernier critère est appliqué lorsque les deux créatures sont en dehors des deux zones : dans ce cas, le choix de la créature sera basé sur son niveau d'énergie (c.-à-d la créature qui a la plus grande quantité d'énergie sera choisie).

L'algorithme génétique utilisé ici fait usage de l'opérateur de croisement à un seul point standard avec un débit de 70% fois l'opération de filtrage, un des gènes a une probabilité d'être muté. L'opérateur de mutation utilise une perturbation gaussienne plutôt qu'une mutation uniforme.

5.7.3 La fonction de fitness

Dans les algorithmes génétiques, la fonction de fitness est d'une extrême importance : c'est l'opérateur qui, durant l'évolution, évalue tous les individus (leurs phénotypes) de la génération actuelle.

Pour évaluer la fonction de fitness d'une créature artificielle, nous testons chaque créature artificielle dans le simulateur basé sur la physique pour un temps de simulation constant (10 secondes pour l'expérience 1 et 30 secondes pour l'expérience 2) en utilisant le réseau ANN codé par chaque chromosome.

Cette fonction sera utilisée pour sélectionner les individus qui utilisent à la fois la sélection par tournoi et l'élitisme. Afin d'évaluer la performance globale de notre contrôleur, une fonction d'agrégation F est utilisée, elle représente une fonction multi-objective qui prend en considération trois points fondamentaux des évaluations qui sont mises à l'échelle par les poids W_1 , W_2 et W_3 (voir l'équation 5.3).

$$F = W_1 * N - W_2 * D - W_3 * E \quad (5.3)$$

Où :

- N est la maximisation du nombre de sources alimentaires obtenues et consommées en 10 secondes de simulation ;
- D est la minimisation de la distance cumulée entre la position actuelle de la créature et la source de nourriture la plus proche pendant le mouvement de la créature artificielle ;
- E est l'énergie minimale consommée, qui est mesurée par des couples cumulés générés par les actionneurs (effecteurs) (voir l'équation 5.4).

F (dans l'équation 5.3) est à maximiser, D et E sont à minimiser, c'est pourquoi ils sont multipliés par (-). $N \in [0,3]$ nombre maximum de sources de nourriture pour chaque créature, $D \in [0,15]$ zéro est la position de départ et la position 15 est la troisième source d'alimentation, enfin $E \in [0,1000]$ qui est l'intervalle de la quantité d'énergie. Pour rendre N, D, $E \in [0,3000]$ qui est l'intervalle commun pour les trois variables N, D et E, nous avons choisi les valeurs de poids telles que : $W_1=1000$, $W_2=200$ et $W_3=3$.

$$D = \sum_{t=0}^T | Y_f - Y_t | \quad (5.4)$$

$$E = \sum_{j=0}^A | E_j | \quad (5.5)$$

Où T est la période de simulation, qui est 1000 pas d'animation (Time Steps) dans l'expérimentation 1, et 3000 dans l'expérimentation 2 (10 et 30 secondes), Y_f est la position de la source de nourriture et Y_t est la position de la créature artificielle au moment t. A est le nombre d'effecteurs (actuateurs) dans une créature artificielle, et E_j est l'énergie dépensée par chaque effecteur. Les valeurs obtenues depuis cette fonction seront utilisées pour comparer les performances des individus entre différentes générations ainsi que pour générer des données statistiques.

5.7.3.1 Le Processus d'évolution

Dans ce chapitre, nous adoptons l'évolution artificielle des organismes vivants qui se développent dans des mondes qui obéissent aux lois de la physique et nous optons également pour le concept de transfert de l'énergie obtenue à partir de certains aliments (sources de nourritures) ou due à des mouvements (ou forces) appliqués à une créature virtuelle en affectant la physique de l'environnement, considérée comme un écosystème.

Nous rappelons que la vie artificielle est un paradigme dans lequel nous concevons un système évolutif artificiel en préparant tout simplement les conditions nécessaires à l'évolution des différentes formes de la vie.

Le modèle présenté dans la figure 5.5 relate le processus d'évolution d'une population de génomes (individus) représentant un réseau de neurones contrôlant le comportement de la créature virtuelle.

Nous utilisons un algorithme génétique (GA) qui optimise les poids du réseau de neurones permettant la réalisation du contrôle des créatures virtuelles pour l'acquisition des comportements adaptatifs nécessaires. Les poids des réseaux de neurones sont stockés dans un chromosome artificiel. Les comportements de la créature virtuelle sont réalisés grâce à un réseau de neurones qui possède une puissance de connexion entre les neurones qui déterminent leur comportement en fonction des informations fournies par l'environnement, et ce, dans le but de converger vers le comportement souhaité (dans ce cas, la

recherche de nourriture ou de nutriments). Nous utilisons ce réseau neuronal comme le cerveau de la créature virtuelle.

Une population initiale de génomes artificiels différents est créée d'une façon aléatoire où chaque génome va contrôler un individu de la population à faire évoluer. Le processus d'évolution artificielle, utilisé pour faire évoluer les comportements de locomotion ainsi que de recherche de nourriture par les créatures artificielles, est décrit comme suit :

1. Évaluer le comportement de chaque créature (individu) en utilisant une fonction de fitness (voir section 5.7.3) qui sera calculée à la fin du temps de simulation (10 secondes) sur le simulateur physique ou bien l'environnement de simulation et selon le mouvement généré par le réseau de neurones qui définit l'individu ;
2. Sélectionner les meilleurs individus obtenus de l'ancienne évaluation, et qui sont les individus avec les meilleurs scores obtenus de la fonction de fitness (avec la distance minimale par rapport à une source de nourriture). Ces individus sélectionnés seront autorisés pour la reproduction ;
3. Reproduire des paires de génomes de la population sélectionnée en effectuant des croisements et des mutations afin d'obtenir de nouveaux génomes (les fils). L'opérateur de croisement choisit un couple de génomes (individus) avec une probabilité de croisement, et les poids du premier génome sont échangés avec ceux du deuxième. L'opérateur de mutation choisit un génome (ensemble de poids) et en choisit un gène (un poids) à partir de ce génome avec la probabilité de mutation et perturbe la valeur du poids de ce gène (en appliquant une perturbation gaussienne). De plus, 20% des individus de la population élue sont retenus pour la prochaine génération ;
4. Les nouveaux individus (génomes) sont utilisés pour effectuer une autre itération dans la boucle, et ce, en recommençant une nouvelle évaluation des nouveaux individus (les fils). La même procédure est répétée avec les mêmes conditions. Ce processus est répété autant de fois que nécessaire jusqu'à obtenir des individus qui permettent la meilleure convergence de la fonction de fitness et jusqu'à ce que tous les individus de la population soient capables d'effectuer une vraie marche rapide vers les sources de nourritures disposées dans l'environnement de simulation.

5.7.4 Validation de l'expérimentation

En permettant à l'évolution artificielle de contrôler les relations entre le corps d'une créature, son cerveau, et son interaction avec l'environnement, nous sommes en mesure de découvrir certaines interdépendances entre le contrôleur (cerveau) d'une créature et l'environnement, et la manière dont ces interdépendances peuvent générer un comportement intelligent par le biais d'un simple échange d'énergie. De même que pour les technologies de simulation, il est devenu plus rapide et plus simple de faire évoluer et d'évaluer le comportement de créatures virtuelles avec des morphologies et des contrôleurs différents. Un des premiers exemples liés à cette idée est celui de l'évolution d'un contrôleur d'une créature artificielle pour développer des comportements de recherche de nutriments dans une simple simulation.

Nous constatons dans ce modèle l'évolution des contrôleurs de créatures artificielles dans un environnement physiquement simulé [167, 166]. Ces contrôleurs recueillent des informations de l'environnement en exploitant uniquement deux senseurs. Ils doivent fournir, par la suite, des sorties pour contrôler dynamiquement une créature artificielle possédant

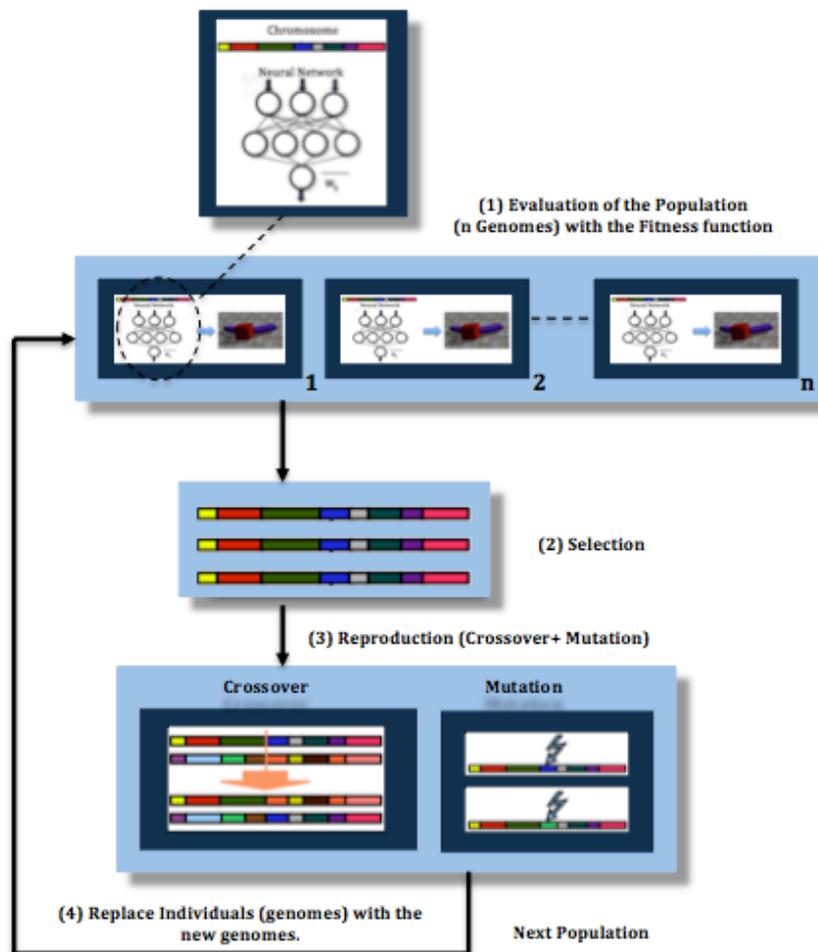


FIGURE 5.5 – Le processus d'évolution pour des comportements de recherche de nourriture réalisés par des créatures artificielles physiquement simulées. Quatre étapes sont présentées : (1) Évaluation de la population (2) Sélection des meilleurs individus (3) Reproduction (Croisement et Mutation), et (4) remplacement des génomes de l'ancienne population.

6 degrés de liberté pour ses jambes, et ce, à chaque pas de simulation. Nous avons réalisé un processus évolutif permettant à ces créatures d'apprendre à marcher aussi rapidement que possible dans une direction donnée, et ce, dans le but d'atteindre un objectif précis. Cet objectif consiste, dans un premier temps, à s'approprier une source de nourriture, et dans un second temps de s'adapter pour s'approprier d'autres sources de nourriture.

Pour ce faire, nous avons réalisé deux expériences pour examiner la façon dont la créature artificielle simulée peut acquérir des comportements de recherche de nourriture en effectuant une locomotion vers ces sources. Nous présentons les résultats numériques et graphiques du comportement obtenu et certaines analyses effectuées. La créature artificielle la mieux évoluée doit avancer aussi efficacement que possible dans un délai de temps prédéfini et en minimiser la dépense d'énergie en se déplaçant.

Les résultats des mouvements des créatures artificielles, qui tentent de s'approprier des sources de nourriture, obtenus après plus de 1700 générations, correspondent à une

marche sur un terrain ;¹ où les créatures artificielles dans les dernières générations développent une marche plus réaliste et plus rapide que celles des premières générations. Le processus d'évolution que nous avons proposé a été en mesure de reproduire avec succès un mouvement de marche stable qui permet aux créatures de se déplacer vers leurs objectifs.

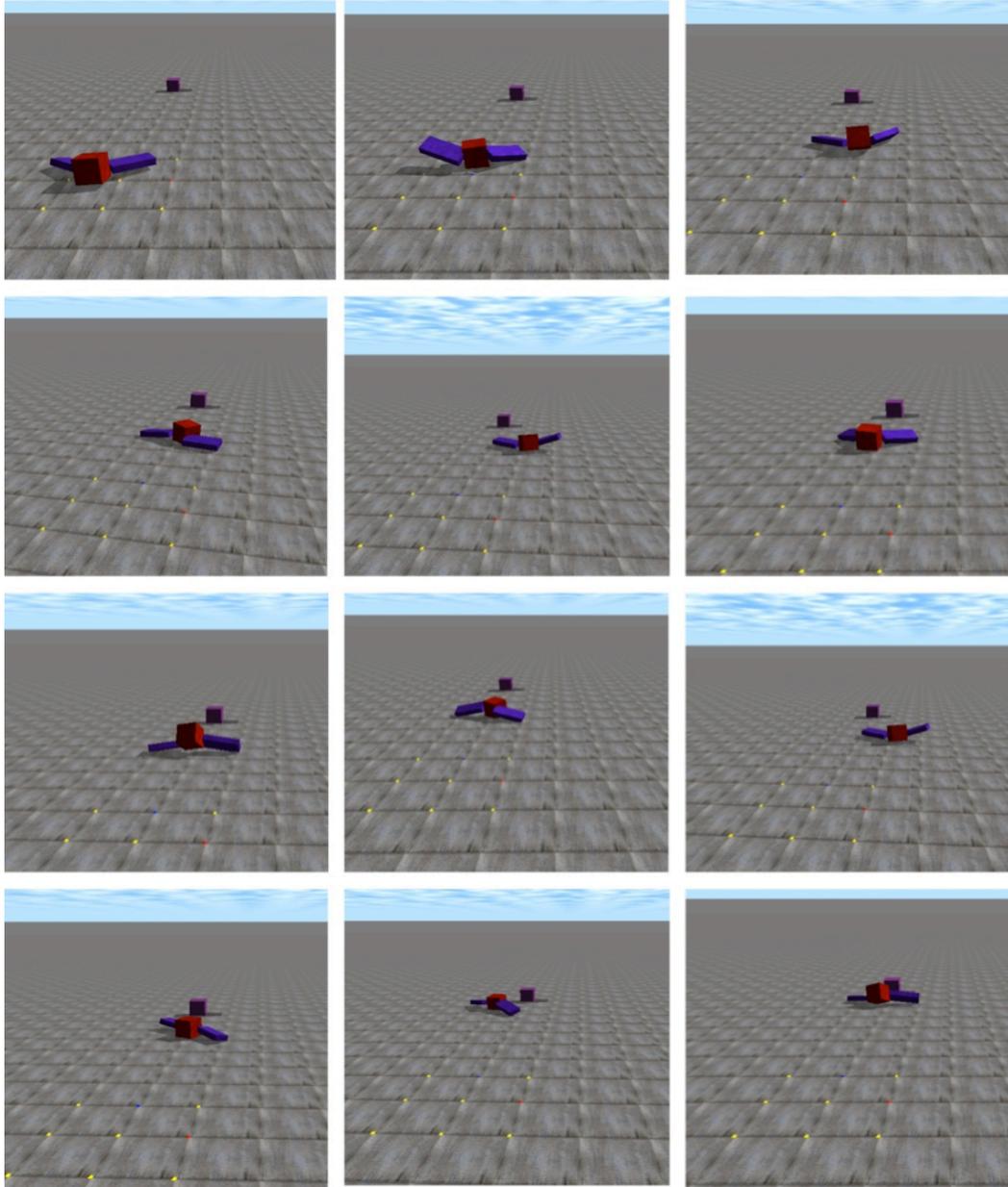


FIGURE 5.6 – Ces captures d'écran montrent les traces des trajectoires de la créature artificielle tentant de s'approprier sa source de nourriture. Sur les premières générations, elle n'exécute que quelques mouvements qui n'étaient pas suffisamment efficaces pour attraper la source. Après plusieurs générations, elle se déplace plus rapidement et la source de nourriture est atteinte.

1. Certains de ces résultats sur des créatures évoluées sont consultables dans le film expérimental réalisé au sein du laboratoire LESIA, il peut être consulté à l'adresse : <http://lesia-lab.net/Videos/VirtualCreature.mov>

5.7.5 Analyse des résultats

5.7.5.1 La recherche d'une source de nourriture

Pour le premier cas, où une source de nourriture unique a été fournie pour chaque individu de la population à évoluer, la créature artificielle acquiert des mouvements efficaces pour atteindre cette source la manière la plus efficace possible.

La figure 5.7 montre certains effecteurs de sortie de la jambe gauche de la créature lors de la locomotion artificielle sur une période de simulation de 10 secondes. Quand la créature artificielle effectue des mouvements ressemblants à une marche sur un terrain, les effecteurs génèrent des phases avec différentes valeurs de niveau entre les bonnes articulations gauche et droite, mais les deux jointures avancent d'une façon symétrique. Une fois suivant le sens positif et une autre fois suivant le sens négatif et en poussant le torse qui est toujours en contact avec le sol.

La figure 5.8 montre les valeurs des vitesses de locomotion réalisée par une créature évoluée. Nous remarquons que les valeurs des vitesses augmentent au fil des générations, ce qui signifie que les créatures se déplacent plus rapidement, ce qui leur permet de s'approprier une source de nourriture le plus tôt possible et, par conséquent, elles récupèrent l'énergie consommée pendant la locomotion.

Le niveau d'énergie diminue inversement à la vitesse, tel que présenté dans la figure 5.9 qui montre un niveau d'énergie décroissant au cours des générations, sauf pour le cas où une créature s'approprie une source d'alimentation qui a pour conséquence le transfert de la quantité d'énergie de cette source d'alimentation vers la créature.

La figure 5.10 montre la meilleure distance et la moyenne des distances calculées par la créature artificielle durant sa marche vers la source d'alimentation. Le graphe des distances ressemble à une droite qui diminue au fil des générations, ce qui signifie que la créature est proche de sa source de nourriture ; pour la génération 800, la valeur de la distance est proche de zéro (c.-à-d. source de nourriture atteinte).

Pour mieux présenter les résultats obtenus à partir du comportement de recherche de nourriture, nous ajoutons un autre graphe (voir figure 5.11) qui montre le chemin des positions initiées par la créature se dirigeant vers sa première source de nourriture ; simulation réalisée en 10 secondes de simulation.

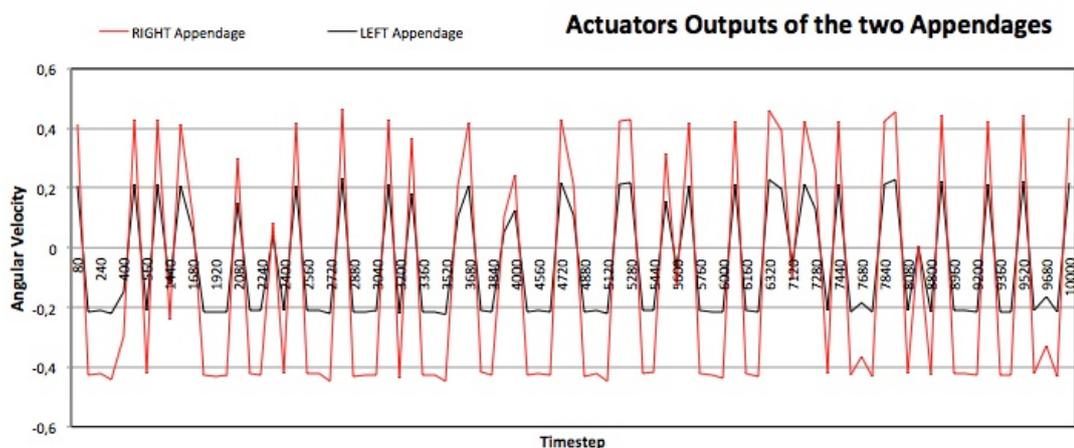


FIGURE 5.7 – Les sorties des effecteurs de la créature artificielle.

5.7. EXPÉRIEMENTATION 1 : RECHERCHE DE NOURRITURE

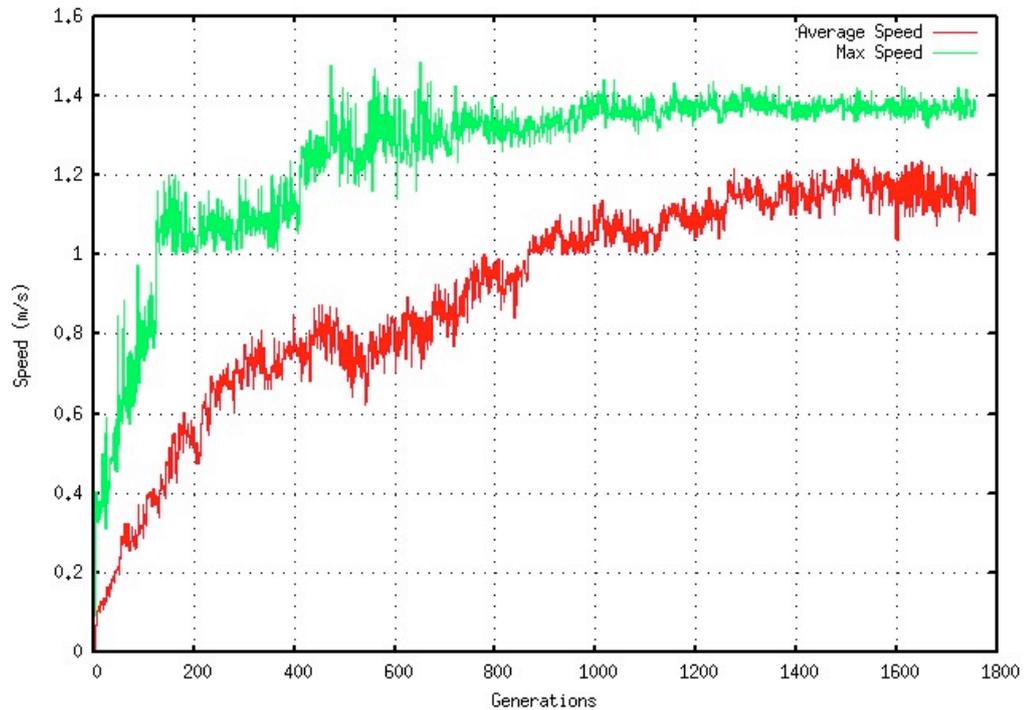


FIGURE 5.8 – Le graphe de vitesse de la meilleure créature et la moyenne de la population de créatures artificielles au fil des générations dans le but d’obtenir la première source de nourriture.

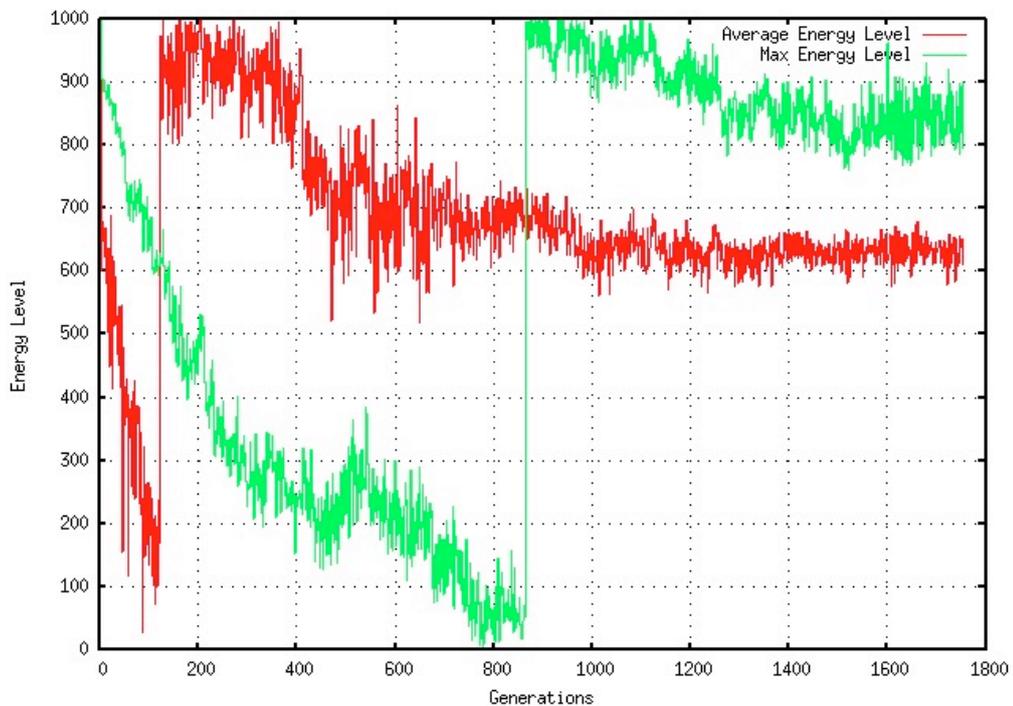


FIGURE 5.9 – Le flux d’énergie (ou énergie métabolique) de la meilleure créature artificielle et la moyenne de la population de créatures artificielles.

5.7. EXPÉRIMENTATION 1 : RECHERCHE DE NOURRITURE

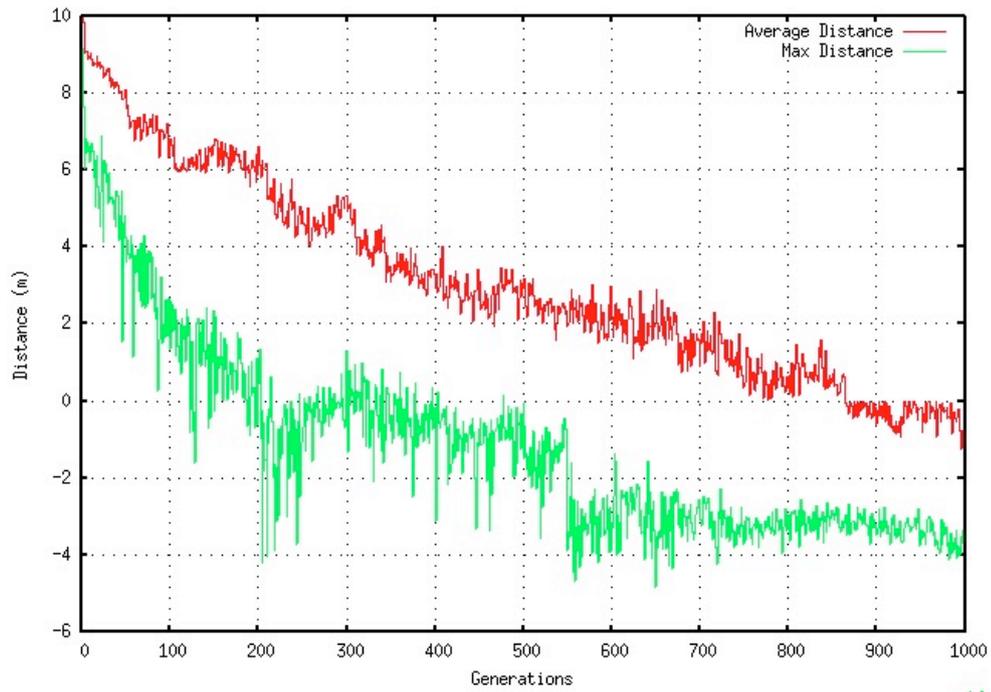


FIGURE 5.10 – Le graphe de distance de la meilleure créature artificielle et la moyenne de la population de créatures artificielles au fil des générations dans le but d’obtenir la première source de nourriture.

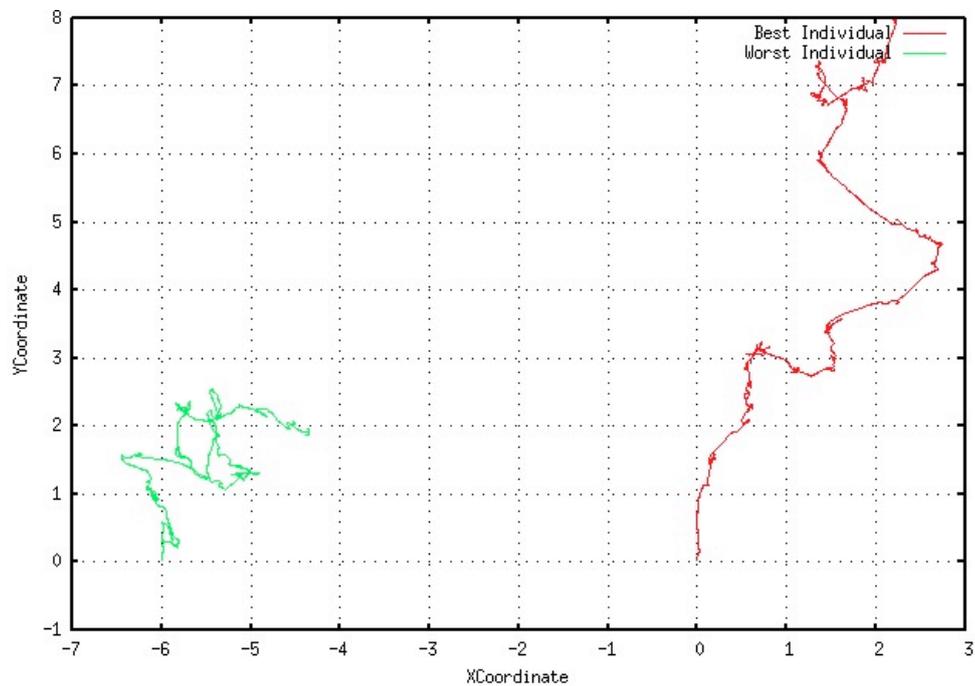


FIGURE 5.11 – Les chemins réalisés par les meilleurs (lignes rouges) et les pires (lignes vertes) individus de la population à évoluer. La source d’alimentation est placée dans la direction d’axe Y.

5.7.5.2 Recherche de plus d'une source d'énergie

L'un des objectifs principaux de ce travail est de trouver, par le biais de l'évolution artificielle, un comportement de recherche de nourritures, le comportement qui est très important pour la construction d'un écosystème artificiel, pour cette raison, nous mettons en place une seconde expérience pour le même comportement, mais avec plusieurs sources de nourritures. Figure 5.12 résume les résultats obtenus pour ce cas.

Le processus d'évolution dans ce travail a permis de produire avec succès une multitude de mouvements de marche qui ont permis à la créature virtuelle de se déplacer vers des sources de nourriture. Nos meilleures créatures évoluées sont capables d'atteindre de multiples sources alimentaires pendant la durée de simulation telle que présentée dans le graphe des distances (voir figure 5.13) où les valeurs sont diminuées de la valeur 15 (c'est-à-dire la distance parcourue est égale à zéro) vers une valeur proche de zéro (c.-à-d. troisième source obtenue).

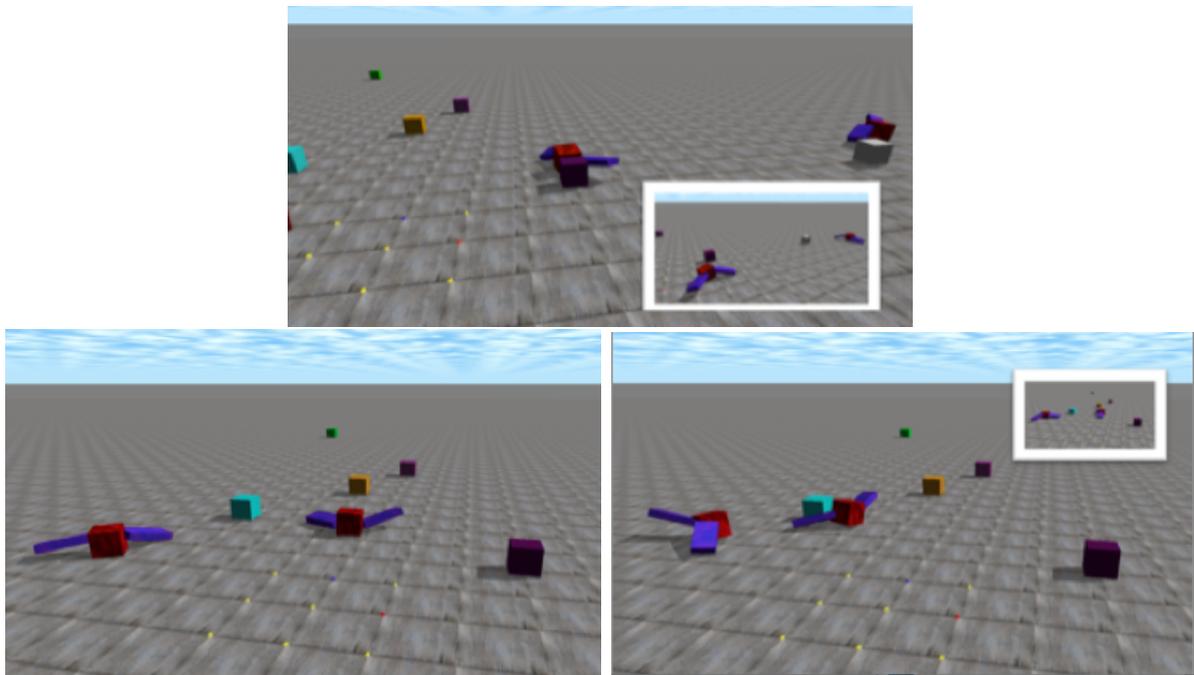


FIGURE 5.12 – Certaines captures d'écran qui montrent les traces de mouvements des créatures virtuelles dans l'écosystème artificiel. Ces captures correspondent aux comportements de recherche de nourriture. La figure du haut montre deux créatures qui atteignent leur première source d'énergie. La figure du milieu montre les deux mêmes créatures qui vont suivre une autre source de nourriture. La figure du bas montre que l'une des créatures atteint sa deuxième source d'énergie. Ces illustrations sont capturées après plusieurs générations d'évolution.

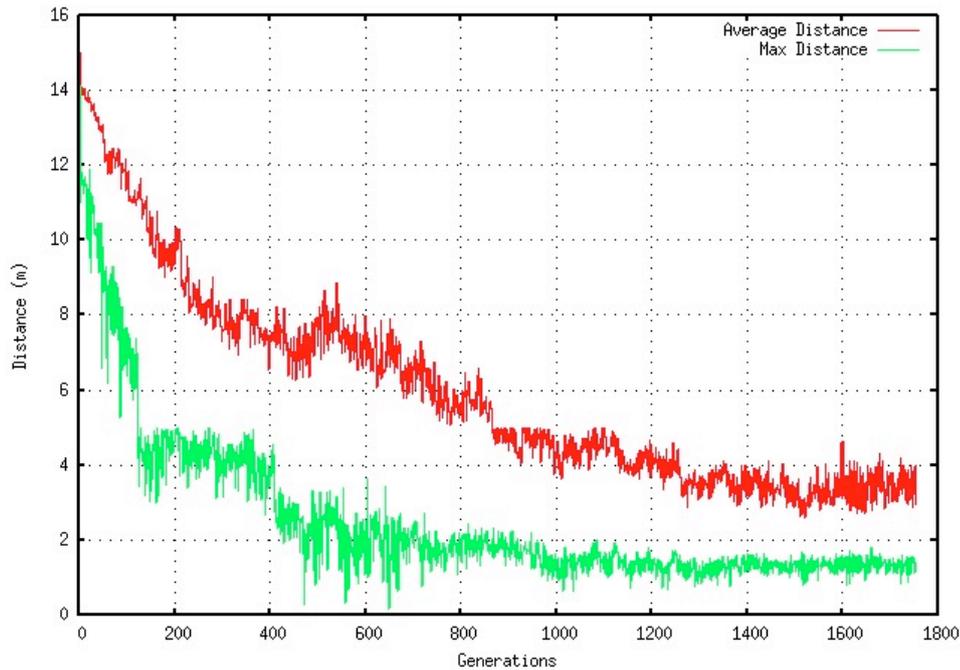


FIGURE 5.13 – Le graphe des distances de la meilleure créature artificielle et la moyenne de la population de créatures artificielles qui a atteint plusieurs sources de nourriture.

5.8 Expérimentation 2 : Poursuite et évasion

La relation prédateur-proie est importante dans le maintien de l'équilibre entre les différentes espèces animales. L'adaptation des comportements défensifs d'une proie est bénéfique dans l'assurance de survie de cette espèce. En même temps, les prédateurs doivent subir certains changements adaptatifs dans leurs comportements pour chercher et capturer des proies d'une façon moins difficile. Sans prédateurs, certaines espèces de proies conduisent d'autres espèces à l'extinction par la concurrence. Sans proie, il n'y aurait pas de prédateurs. Ainsi, cette relation est essentielle à l'existence de la vie comme nous la connaissons.

Chacune des espèces prédatrices et proies peut influencer l'évolution de l'autre espèce. Les traits qui améliorent la capacité d'un prédateur à trouver et capturer sa proie seront sélectionnés par évolution, ainsi que les traits qui améliorent la capacité de la proie à éviter d'être consommée. Les «objectifs» de ces traits ne sont pas compatibles, et c'est l'interaction de ces pressions sélectives qui influe sur la dynamique des populations de prédateurs et proies. Prédire le résultat des interactions entre les espèces représente également un intérêt pour les biologistes qui tentent de comprendre comment les communautés sont structurées et durables. Dans notre cas, l'objectif principal de cette expérimentation est de trouver par coévolution les meilleurs traits de comportements de poursuite (par des prédateurs) et des comportements d'évasion (par des proies). Cette expérimentation, malgré sa complexité par rapport au comportement de recherche de nourriture, est d'une importance cruciale dans la construction d'un écosystème artificiel, car ensuite nous pouvons étudier la dynamique d'évolution de ces espèces prédatrices et proies. Nous pouvons, également, observer l'échange d'énergie et de matière entre plusieurs classes de créatures artificielles.

Imaginons la scène suivante illustrée par la figure 5.14 : un environnement extrêmement simple abrite un prédateur dont le comportement doit émerger par évolution, qui est d'attaquer les proies qui sont à sa portée, lesquelles doivent s'enfuir de leurs prédateurs.

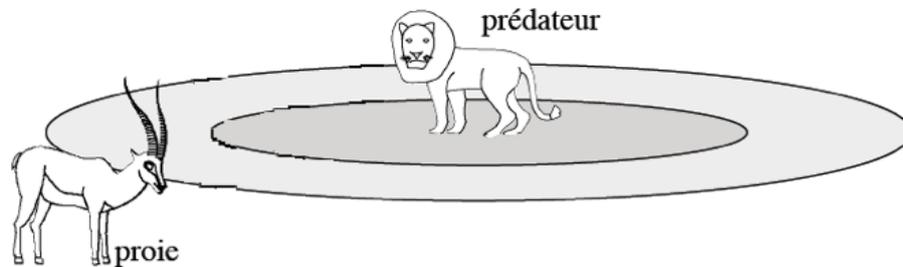


FIGURE 5.14 – La simulation du comportement prédateur/proie met en scène deux agents contrôlés par un processus de coévolution par un algorithme génétique. Le prédateur doit attraper la proie alors que la proie, munie d'un contrôleur comportemental, doit échapper au prédateur [172].

L'expérimentation repose sur une simulation classique du type prédateur/proie. La créature proie munie d'un contrôleur par un réseau de neurones doit apprendre, dans différentes situations, à échapper au prédateur. Et la créature prédatrice doit améliorer ses capacités de trouver et capturer une proie. Les simulations mettent en scène un ensemble de créatures virtuelles de deux espèces (prédateurs et proies) évoluant dans un environnement en 3D physiquement simulé sans obstacle et sans sources de nourritures.

5.8.1 Conditions expérimentales

L'environnement virtuel des simulations est d'une extrême simplicité. Il s'agit d'une surface 3D non bornée continue, et sans obstacle dans laquelle toutes les créatures artificielles de la simulation sont libres de se déplacer. Fondamentalement, l'environnement comporte deux classes de créatures : les prédateurs et les proies (voir la figure 5.14) qui se déplacent grâce au modèle décrit dans les sections 5.3 et 5.4.

Afin de mieux présenter les deux populations de créatures prédatrices et proies, nous avons proposé pour chaque créature prédatrice une seule proie dans son champ de vision malgré que toutes les autres créatures existent dans un environnement partagé. Une créature prédatrice initiale est positionnée à l'origine de l'espace de simulation (position $(0, 0)$) les autres sont alignées avec elle avec une distance (d) entre chaque paire. Une proie est positionnée en face de chaque prédateur (dans sa direction de locomotion) à une distance R_0 (voir figure 5.15).

5.8.2 Paramètres d'évolution

Un algorithme génétique est utilisé avec deux populations à faire co-évoluer en concurrence et en même temps (c.-à-d. 100 paires de créatures prédatrices/proies). Une sélection par tournoi est utilisée pour choisir une nouvelle paire d'individus (prédateur-proie) à chaque fois. L'évaluation de chaque individu est appliquée sur une paire afin de fournir une note pour l'individu prédateur et une autre pour l'individu proie.

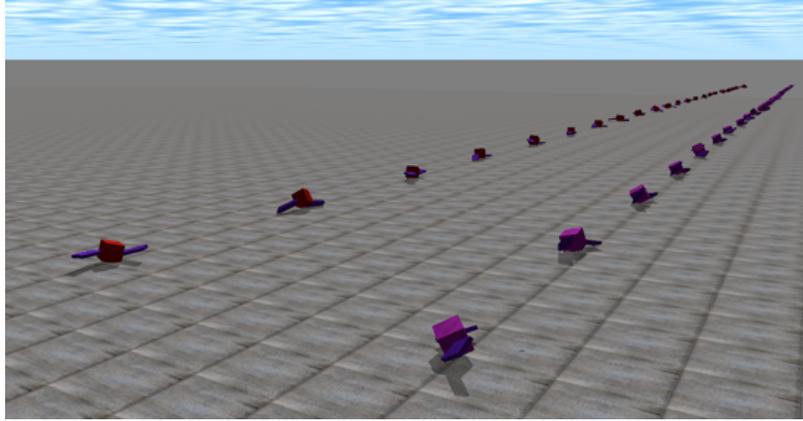


FIGURE 5.15 – Les paramètres de configuration de l’environnement de simulation avec les deux classes de créatures artificielles, les prédateurs en (mauve) et les proies (rouges).

Pour chaque tournoi deux individus, par population, peuvent produire un descendant par l’un des opérateurs génétiques (le croisement). Ensuite, une mutation est appliquée au descendant. Une nouvelle population de descendants est construite pour chaque espèce, et qui va fonctionner en boucle jusqu’à trouver la solution. Les valeurs des paramètres utilisés dans le processus d’évolution sont les mêmes présentés dans la table (5.2), qui sont appliqués à chacune des populations devant évoluer l’une par rapport à l’autre.

5.8.3 La fonction de fitness

L’aptitude de chaque individu est calculée après une rencontre entre un prédateur et une proie par deux fonctions de fitness opposées, l’une doit maximiser la distance entre les deux créatures et l’autre doit la minimiser, et ceci dans un intervalle que nous avons homogénéisé pour faciliter les calculs et les évaluations.

L’aptitude d’un prédateur est définie par l’équation 5.6, cette valeur de fitness est proportionnelle à la distance franchie vers la proie, sur la base de R_0 qui est la distance initiale (présentée par le rayon du cercle de distance entre le prédateur et sa proie, comme présenté dans la figure 5.16) et R_f ; la distance finale. Si le prédateur avance dans une direction différente de celle voulue (exp la direction inverse) ou si la distance R_f est en dehors du cercle du rayon R_0 , alors la valeur de fitness sera remise à zéro pour que l’individu soit supprimé de la prochaine génération. Sachant que α_1 présente un facteur de normalisation qui dépend de la valeur de fitness de la proie.

$$F_{Predator} = \left[\begin{cases} \alpha_1 \times \frac{R_0 - R_f}{R_0} & (R_f \leq R_0) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \right] \quad (5.6)$$

L’aptitude de la proie est définie par l’équation 5.7, où la valeur de la fitness d’une proie est la distance qu’elle a parcourue (L) en s’enfuyant par rapport à la valeur de la distance initiale (L_n). Ceci se produit si, en s’enfuyant, la proie prend la direction opposée à celle où il y a un prédateur. Dans le cas contraire, la valeur de la fonction de fitness sera remise à zéro pour que cet individu soit retiré de la population (c.-à-d. comportement erroné), sachant que α_2 est un poids de normalisation.

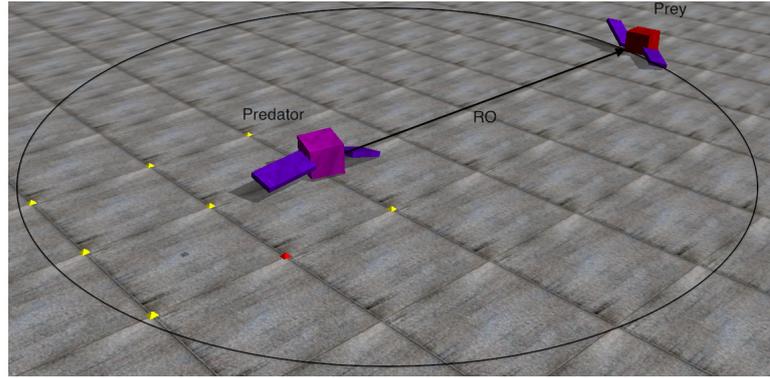


FIGURE 5.16 – Le rayon de distance entre le prédateur est la proie.

$$F_{Prey} = \left[\begin{cases} \alpha_2 \times \frac{L}{L_n} & (Ln > L) \\ 0 & sinon \end{cases} \right] \quad (5.7)$$

5.8.4 Le processus de coévolution

Nous avons choisi un modèle "Prédateur/Proie" dans lequel les comportements des proies et des prédateurs doivent évoluer simultanément en leur donnant des capacités nécessaires pour survivre. Notre écosystème est composé d'individus appartenant à deux niveaux trophiques (c.-à-d. deux populations) : proie et prédateur. Chaque individu possède son propre génome (poids du réseau de neurones), et peut être croisé avec d'autres individus génétiquement similaires et produire une descendance avec une combinaison modifiée des génomes de ses parents.

Une population initiale de prédateurs (P_1) (des génomes artificiels différents) est créée d'une façon aléatoire où chaque génome va contrôler un individu de la population (P_1) par rapport à un autre individu de la population ennemie (P_2). Le processus de coévolution entre les individus des deux populations fonctionne comme suit :

- Après une rencontre entre un individu de la population prédateur et un individu de la population proie, nous évaluons le comportement de chaque créature en utilisant la fonction de fitness appropriée (voir la section 5.8.3) qui sera calculée à la fin du temps de simulation (10 secondes).
- Sélection des meilleurs individus obtenus de l'ancienne évaluation ; une sélection est effectuée dans la population prédatrice (P_1) (les meilleurs individus choisis sont ceux possédant la plus petite valeur de fitness qui est différente de zéro), et une autre sélection est effectuée dans la population des proies (P_2) (les meilleurs individus choisis sont ceux avec la plus grande valeur de fitness). Ces individus sélectionnés seront autorisés pour la reproduction ;
- Reproduction des paires de génomes de la population (P_1) en effectuant des croisements et des mutations afin d'obtenir de nouveaux génomes (les fils de la même population). Les opérateurs de croisement et de mutation pour chaque population (P_1 ou P_2) fonctionnent comme dans le cas de la section 5.6.
- Les nouveaux individus (génomes) de chaque population sont utilisés pour effectuer une autre itération dans la boucle évolutionnaire, et ce, en recommençant une nouvelle évaluation des nouveaux individus (les fils) entre deux populations de deux

espèces différentes. La même procédure est répétée avec les mêmes conditions pour les deux populations. Ce processus est répété autant de fois que nécessaire jusqu'à obtenir des individus des deux populations qui permettent la meilleure convergence de la fonction de fitness, il se peut qu'une population converge avant la deuxième, alors dans ce cas, le processus de coévolution continue jusqu'à obtenir les meilleurs comportements adaptatifs des deux espèces de créatures prédatrices (qui peuvent attraper leurs proies) et proies (qui peuvent réussir à s'enfuir des prédateurs).

5.8.5 Validation de l'expérimentation

Dans cette expérimentation, nous avons étudié l'interaction de deux espèces sélectionnées par coévolution, un prédateur et une proie, pour les comportements de chasse et d'évasion. Les deux espèces ont une configuration de corps identique, ainsi que pour les paramètres physiques (du couple moteur maximum dans chaque DOF), et leurs cerveaux ont des contraintes de croissance identiques (même nombre de divisions, types de neurones, etc.), mais les deux espèces sont marquées différemment (couleurs du torse). Les contrôleurs des deux espèces recueillent des informations de l'environnement ainsi que de l'adversaire en exploitant seulement deux senseurs. Ils doivent fournir, par la suite, des sorties pour contrôler dynamiquement des créatures artificielles possédant 6 degrés de liberté au niveau de leurs jambes, et ce, à chaque pas de simulation.

Nous avons réalisé un processus co-évolutionnaire permettant aux créatures des deux espèces d'apprendre à marcher aussi rapidement que possible dans une direction donnée, et ce, dans le but d'atteindre des objectifs opposés.

La créature prédatrice tente dans un premier temps, à adapter son corps pour marcher de la façon la plus efficace et la plus rapide possibles dans une direction donnée afin de chasser une proie, et ce, en minimisant la distance qui la sépare de la proie. Cette même proie, utilise son processus d'évolution pour échapper à son prédateur, tout en maximisant la distance entre elles.

Nous remarquons que pour échapper à son prédateur, la créature proie peut choisir entre plusieurs directions sauf celle d'où vient le prédateur. Par contre, le prédateur ne doit suivre qu'une seule direction en premier lieu, ensuite il doit mettre à jour ses senseurs pour connaître la nouvelle direction de la proie, afin de continuer à la suivre.

Nous présentons ici les résultats préliminaires graphiques (voir figure 5.17) illustrant la façon dont les créatures prédatrices ainsi que les créatures proies, ont appris à utiliser leurs corps dans le simulateur pour augmenter les forces des effecteurs, ainsi que leur vitesse linéaire. Ce comportement leur permet de se déplacer plus rapidement et plus librement dans la direction du but recherché (c.-à-d. suivre ou fuir). Après plusieurs centaines de générations, le processus d'évolution arrive à mieux adapter les créatures aux fonctions de fitness définies. Néanmoins, il est à noter que les réponses des prédateurs sont plus rapides, en nombre de générations, par rapport à celles des proies. Pour le prédateur, on parle de capture lorsque celui-ci touche le torse de la proie avec n'importe laquelle des parties de son corps. Une créature capturée est désactivée et ne peut plus être détectée.

Les figures 5.17 et 5.18 montrent des exemples de résultats des mouvements des créatures prédatrices et proies au cours de l'évolution. Plusieurs figures permettent de comprendre le déroulement de la simulation et la façon dont plusieurs des créatures prédatrices ont réussi à s'approcher leurs proies. Nous avons également présenté quelques exemples de proies qui tentaient de fuir leurs prédateurs en prenant la direction inverse de locomotion

(panel 2 de la figure 5.17)

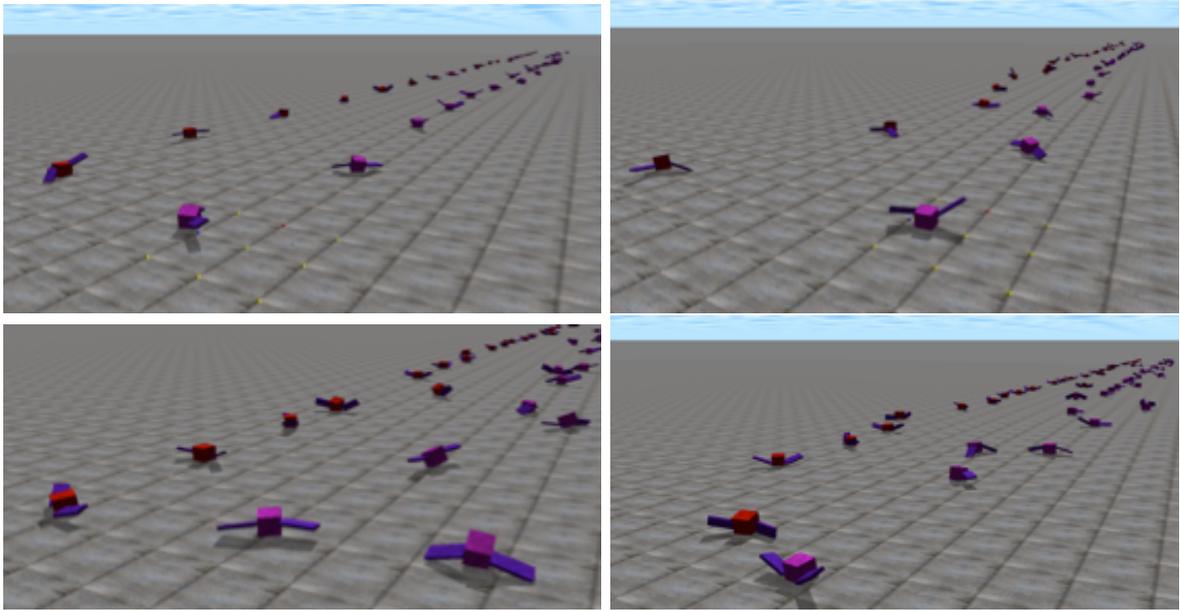


FIGURE 5.17 – Quatre captures d’écran de la simulation sur des intervalles de temps différents. La première à gauche présente les premières tentatives de quelques individus de la population des prédateurs (en mauve). Sur la deuxième à droite, en plus des prédateurs qui avancent, quelques proies avancent également. Sur la troisième capture à gauche, plusieurs des proies ont réussi à s’enfuir de leurs prédateurs. La quatrième capture à droite montre une des proies capturées.

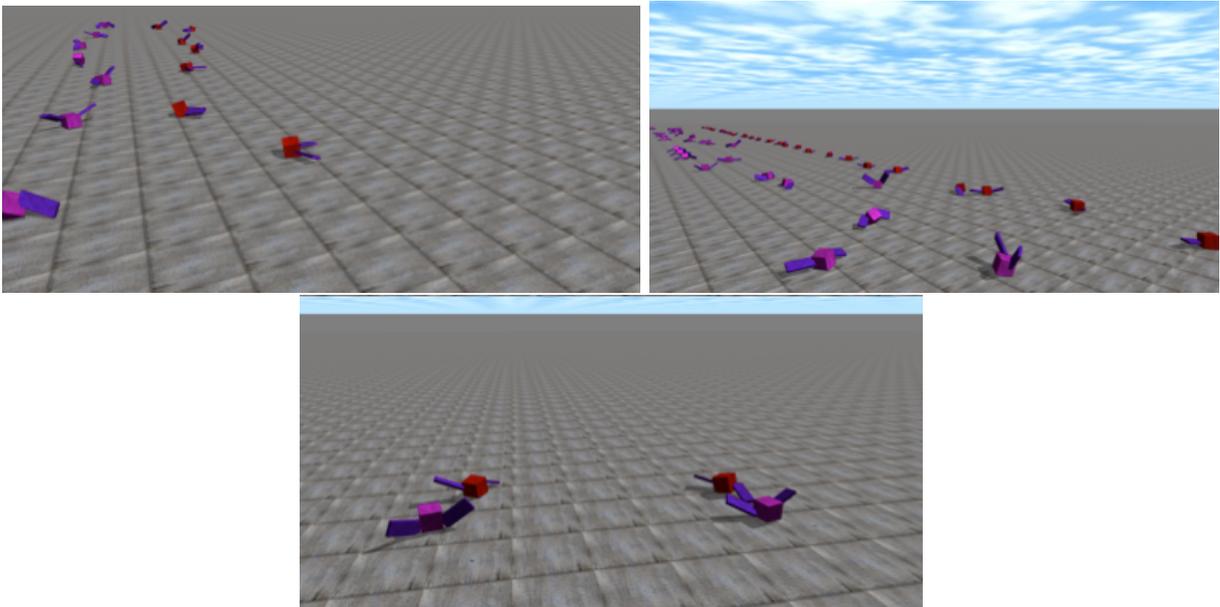


FIGURE 5.18 – Capture d’écran d’une autre vue montrant les traces de mouvements des créatures artificielles des deux espèces en coévolution (prédateurs-proies), où les meilleures créatures prédatrices y figurent.

5.8.6 Analyse des résultats

Nous présentons, dans cette partie, les résultats numériques des comportements obtenus et certaines analyses effectuées. La créature artificielle prédatrice la mieux évoluée doit avancer aussi efficacement que possible dans un délai de temps prédéfini, et ce, en direction d'une proie qui est placée en face à elle. Une seule évaluation dure 1000 pas de temps divisés sur 100 paires d'individus (100 prédateurs-proies). Pendant ce temps (période d'évaluation), les créatures de chaque espèce se déplacent à chaque pas de temps, selon les détails de la simulation physique, y compris les vitesses des créatures. Des tests d'évolution de 5000 générations ont été effectivement effectués.

L'évaluation de chaque espèce est effectuée selon les équations décrites plus haut (section 5.8.3), sachant que la distance initiale choisie entre chaque pair de créatures prédateur et proie est $R_0=6$, les valeurs α_1 et α_2 choisies sont successivement (500 et 50). A la fin de chaque génération, les valeurs de fitness sont utilisées pour choisir les individus qui vont servir comme base de reproduction de la population de la nouvelle génération. Le graphe de la figure 5.19 présente les variations des valeurs de fitness des deux espèces co-évoluées (prédateurs-proies). Nous remarquons sur ce graphe, une première évaluation dans les toutes premières générations (environ les 200 premières générations), une grande (petite) valeur de fitness pour, successivement, les prédateurs (qui minimisent) et les proies (qui maximisent) ces valeurs de fitness. Autrement dit l'aptitude moyenne de la population des prédateurs (proies) était très élevée (faible).

De la génération 200, jusqu'à la génération 600, la fitness de la population de proies augmente progressivement, tandis que la fitness des prédateurs diminue. Spécifiquement dans l'intervalle [200-600], les fonctions de fitness des prédateurs présentent les valeurs les plus évoluées car les créatures prédatrices, ont réussi à augmenter leurs vitesses de locomotion. De plus, les proies associées à ces prédateurs dans ce même intervalle ne se sont pas encore améliorées pour s'éloigner suffisamment de leurs prédateurs. Ainsi, nous obtenons les meilleures stratégies de chasse évoluées par les individus de la population de prédateurs.

De la génération 600 jusqu'à la génération 2000, nous remarquons différentes caractéristiques comportementales, entre diminution et augmentation des fitness des deux populations, cela est dû à une amélioration (diminution) de certains individus. Cependant, la totalité de la population ne répond pas de la même façon : nous pouvons appeler ça, un interrupteur dans la performance de la fitness. Ceci est dû à l'émergence d'individus avec une forte stratégie défensive (des proies), ou à des erreurs dans le comportement des proies (exp. Locomotion dans des directions erronées).

De plus, de la génération 2000 jusqu'à la génération 2400, des stratégies défensives ont émergé dans la population des proies, et les prédateurs fonctionnent correctement, la course fonctionne comme prévu pour la moyenne des populations des deux espèces.

La tendance pour certains individus de la population des proies à maintenir une valeur élevée de la fitness dans cette génération peut être simplement due à la présence de prédateurs incompetents.

Enfin (de la génération 2400 jusqu'à 5000), les groupes de prédateurs fonctionnent tous de la même façon et leurs valeurs de fitness sont stabilisées. Pour ce qui est de la population de proies, on note une augmentation des fitness mis à part les cas où les prédateurs sont beaucoup plus évolués. Nous avons également noter que malgré les capacités défensives développées pour les proies, les prédateurs restent les mieux adaptés.

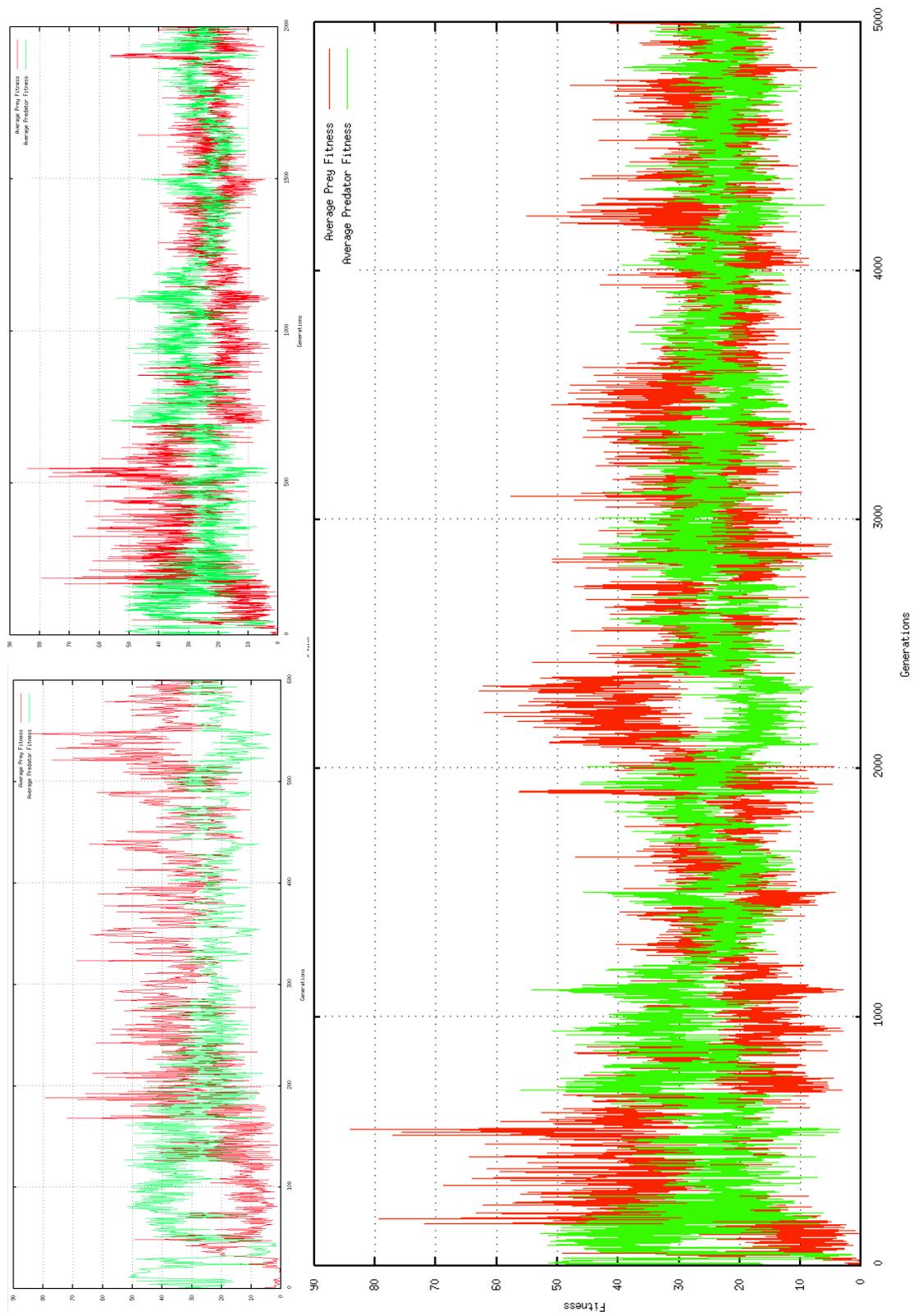


FIGURE 5.19 – Le graphe d'évolution des valeurs moyenne de la fitness des prédateurs ainsi que celles des proies au cours des générations. Le premier à gauche représente le même graphe pour 600 générations. Celui de droite représente les mêmes valeurs pour 200 générations.

5.9 Récapitulatifs des résultats obtenus

Ce chapitre met l'accent sur la deuxième étape entreprise dans la construction d'un écosystème artificiel simulé. Dans cette partie, nous avons présenté les expériences et les résultats d'un contrôleur de cerveau d'une créature artificielle par évolution artificielle pour obtenir des comportements dans un écosystème artificiel, qui sont : la recherche de nourriture, la poursuite et la fuite. Nous avons également présenté une autre expérimentation de coévolution de deux populations de prédateurs et de proies. Nous avons, dans un premier temps, mis l'accent sur les résultats des comportements de recherche de nourriture réalisés par une créature artificielle. Nous avons ensuite, présenté les résultats des expériences d'évolution comportementale dynamique d'un scénario prédateur-proie co-évolutif dans un environnement 3D physiquement simulé.

Tous les comportements obtenus sont le résultat de l'interaction de la créature artificielle avec l'environnement par l'intermédiaire d'un système sensoriel simple. Les contrôleurs obtenus (soit les fourrageurs, les prédateurs ou les proies) sont compatibles avec les lois de la physique et fournissent des mouvements dominés par la dynamique newtonienne.

5.10 Limites du modèle

Tout d'abord, l'objectif présenté dans ce travail est de reproduire par évolution des comportements complexes de créatures artificielles, qui cherchent de la nourriture (des sources fixes de nourriture ou des créatures vivantes). Avant toute chose, chaque créature doit faire évoluer ses capacités de survie dans son environnement de simulation, ensuite elle doit améliorer ses capacités de communication avec l'environnement, et à la fin elle doit interagir avec cet environnement de la façon la plus efficace. Cependant, toutes ces capacités et tous ces comportements doivent être exploités en harmonie avec la disponibilité de la nourriture, et les capacités des autres créatures. Par ailleurs, dans le but de faire émerger des comportements équilibrés d'échange de matière et d'énergie, une analyse doit être faite sur la croissance du nombre de créatures, quelle que soit l'espèce. Pour ce faire, il faut acquérir autant d'énergie que possible pour se reproduire. Ainsi, la limite majeure de ce travail est l'absence de l'aspect de reproduction des espèces, et l'analyse des données d'échange de la matière et de l'énergie entre chaque espèce de créature et les autres.

Pour ce qui est des inconvénients de ce modèle déjà établi, nous avons quelques limites par rapport aux travaux déjà réalisés dans ce domaine, telles que :

- les capacités de recherche des sources de nourritures dans des lieux différents et avec des tailles et caractéristiques différentes également.
- un autre inconvénient de notre modèle est celui du type de contrôleur que nous avons utilisé (le réseau de neurones récurrent), une des solutions les mieux adaptées à ce problème serait d'utiliser les réseaux de neurones évolutifs NEAT, qui permettent aux créatures avec leurs comportements évolués d'émerger vers d'autres processus afin de mieux répondre aux besoins de simulations et aux contraintes de l'environnement.

Etude Comparative

6.1 Introduction

L'étude comparative que nous proposons est réalisée afin de tirer des conclusions sur les principaux points étudiés dans nos modèles et qui sont en commun avec les travaux similaires existants dans la littérature. Cette étude permet, dans un premier temps, de nous auto-évaluer en présentant les différences positives, en termes de contributions et négatives. Ainsi nous proposons dans cette section de réaliser une étude comparative entre les modèles proposés dans notre entreprise, d'une part et les différents modèles de la littérature, d'autre part et déjà présentés dans la partie dédiée à l'état de l'art. Cette comparaison est structurée autour des deux grandes problématiques présentées dans les chapitres 4 et 5 qui ont étudié les questions de la modélisation d'un écosystème de bactéries à partir d'un modèle cellulaire et celle de la simulation de créatures fourrageurs 3D dans un environnement physique. Les critères de comparaison sont définis comme suit :

1. Le type des créatures artificielles simulées ;
2. Les comportements développés ;
3. La modélisation d'un écosystème ;
4. Les capacités des systèmes.

6.2 Les écosystèmes de créatures virtuelles

Le but de l'étude présentée dans le chapitre 5 de la présente thèse consiste à obtenir par évolution des comportements de recherche de nourritures par des créatures tridimensionnelles physiquement simulées dans un écosystème artificiel.

Le problème lié au développement, par évolution, de comportement de créatures artificielles (unicellulaires ou multicellulaires) est d'une complexité importante notamment dans des environnements physiquement simulés tels que vus dans les travaux de la littérature (Chaumont [48, 49], Pilat [101], Palmer [170] et autres), ce qui nous permet de prendre conscience et noter la nécessité de la division des tâches à accomplir en sous tâches. En prenant l'exemple de nos créatures fourrageurs, qui consiste en l'évolution de comportements de locomotion de créatures artificielles dans leur environnement. Ces créatures artificielles auront ensuite à faire évoluer des capacités de vision (en utilisant les senseurs rajoutés) afin de rechercher de la nourriture (fourrageur ou prédation). Notre

travail est aligné sur les travaux récents existant dans la littérature, dont nous avons présenté certains au niveau de l'état de l'art de cette thèse (voir tableau 3.1 du chapitre 3). Par ailleurs, les objectifs visés par notre travail sont divers et différents des autres travaux développés, en plus de certains points forts qui différencient notre modèle par rapport aux autres.

Afin de mieux comparer notre travail de développement de comportements de créatures artificielles avec d'autres qui se sont intéressés à la même problématique, nous présentons dans le tableau 6.1, certains critères de similarité entre notre travail et ceux des autres travaux que nous avons nous même sélectionnés. Nous pouvons constater dans le tableau suivant (Tableau 6.1) certains points importants sur les travaux traitant les créatures artificielles. Ceux-ci focalisent leur effort sur les types de créatures simulées, leurs comportements, le type de leurs contrôleurs ainsi que le type des environnements simulés, et plus spécifiquement leur lien avec la modélisation d'un écosystème intégral ou partiel. À la fin de ce tableau, nous avons inséré notre travail afin de l'évaluer sur les mêmes critères et de pouvoir ainsi présenter ses points forts, ainsi que les points en commun.

Différemment aux autres, nous pouvons noter, dans ce tableau, que notre travail utilise une fonction de fitness multi-objective, que les comportements des créatures artificielles que nous avons développées sont presque identiques (fourragement, poursuite et évaison), que les types de créatures artificielles sont des corps tridimensionnels articulés et physiquement simulés, tout comme certains des travaux présentés. Un autre point singulier et avantageux consiste en l'utilisation du métabolisme et la dépense de l'énergie non seulement dans la fonction de fitness, mais également au niveau du déplacement. Cependant, il y'a certains points qui ne sont pas bien exploités dans notre modèle et des idées qui ne sont pas assez développées, tels que l'étude de la dynamique des populations de créatures de chaque type (fourrageurs, prédateurs et proies), ni l'échange entre chaque type de créatures.

La nature de l'environnement choisi est caractérisée d'une part, par son réalisme du fait que c'est un environnement physique et d'autre part, par sa simplicité. Cependant, la simplicité dans des environnements naturels n'est pas souhaitée, du fait que dans la nature il y a plusieurs facteurs de complexité et de non-homogénéité. Ainsi, et à titre d'exemple, un terrain accidenté plutôt que plat serait mieux utilisé dans ce genre de simulation. Le type des ressources disponibles dans l'environnement peut être amélioré, car dans notre cas ces ressources ne sont pas diffusées dans l'environnement par rapport à un mécanisme bien défini, mais juste déposées arbitrairement dans l'environnement.

Une autre insuffisance est le type de contrôleur, malgré que c'est le type le plus utilisé par plusieurs travaux et depuis si longtemps [213], [53] mais reste traditionnel pour ce genre d'application, surtout vu le développement connu dans le domaine du contrôle et de la robotique évolutionnaire (exp NEAT et Hyper NEAT [220]). Cependant cette insuffisance a déjà reçu une réponse, dans notre équipe de travail, par le travail de [234], alors elle ne sera pas considérée comme perspective. La dernière insuffisance est celle rencontrée avec notre première action de développement de robot humanoïde [163]. Raison pour laquelle nous avons choisi une morphologie plus simple pour éviter que l'environnement soit contraint par la surcharge des mouvements de plusieurs créatures sur le même simulateur. Pour pallier ce dernier point, un autre travail dans notre équipe du laboratoire LESIA [28] qui consiste à paralléliser le processus d'évolution de l'algorithme génétique, ce dernier ayant pu répondre à cette problématique, mais n'est pas utilisé dans cette thèse.

Modèles	Type de créatures	Fonction de fitness	Contrôleur	L'environnement	Comportement	Métabolisme	Ecosystème
Mauno Rönkkö [205]	Coléoptères, vers de terre et brins d'herbe	/	Un système de particules	3D Complexe	Dynamiques émergentes de chaînes alimentaires.	Energie	Chaîne alimentaire
DOVE [176]	Prédateur, proies et plantes	Simple	Capacités encodées	2D Complexe	Fourragement, poursuite et évasion	Biomasse	Plasticité phénotypique
FCM [88]	Prédateur et proie	Sélection naturelle	FCM (Fuzzy Cognitive Map)	2D Complexe	Fourragement, poursuite et évasion	Energie	Prédateurs-proies
Chaumont [48, 49]	Fourrageurs	Complexe	Un réseau de neurones	Physique 3D	Fourragement.	Energie	fourrageurs
Erdei [78, 79]	Prédateurs proies	Implicite	GRN (réseau régulateur génétique)	Liquide en 2D	Suivie d'une proie mobile	Energie	Prédateurs-proies
Pilat [101]	Araignées prédateurs proies.	Simple	Réseau de neurones.	Physique en 3D	Poursuite et évasion	/	Prédateurs-proies
Palmer [170]	Araignées prédateurs proies.	Simple	Réseau de neurones.	Physique en 3D	Poursuite et évasion	/	Prédateurs-proies
Ouannes [167]	Fourrageurs, prédateurs et proies.	Multi objective	Réseau de neurones.	Physique en 3D	Fourragement en poursuite et évasion.	Energie	Prédateurs-proies

TABLE 6.1 – Table comparative entre les travaux selon certains critères de simulation

6.3 Les écosystèmes bactériens unicellulaires

Un des principaux buts de cette thèse est de simuler le comportement de toute une population à partir d'un modèle microscopique d'une seule cellule. Ce modèle (présenté dans le chapitre 4) nous permet de comprendre certains concepts sur les comportements de populations à partir des informations sur les composants et les réactions moléculaires d'une cellule. Ce but requiert des modèles suffisamment détaillés pour capturer des processus intercellulaires centraux, qui en même temps autorisent une simulation d'une population entière. Dans ce modèle, comme résultat, nous avons obtenu un processus de chimiotaxie optimal qui a été observé suivant des intervalles de concentrations de l'activité de la kinase CheA, quand la concentration de la réponse du régulateur CheY tombe dans un intervalle qui permet au modèle de détailler le mouvement d'une cellule, qui résulte en des fréquences de tumbling qui dépendent de la direction de natation vers des attractants (nutriments).

Le modèle de métabolisme permet aux bactéries de contrôler leurs dépenses d'énergie en mouvement et en reproduction et de pouvoir en gagner assez pour rester en vie. Ce mécanisme est d'une importance globale, car il contrôle le processus de reproduction (division) qui va permettre à une population d'apparaître. Cependant le comportement de groupe ne peut émerger que si nous intégrons un autre modèle de communication. Un modèle de communication chimique est adopté comme une extension à ce travail, et qui consiste à utiliser une sorte de molécules chimiques afin d'autoriser les bactéries qui forment des groupes, de communiquer ensemble, ensuite nous pouvons étudier les comportements des populations avec plus de détails.

Dans ce qui suit, nous présentons un tableau qui décrit les capacités de la solution développée dans notre travail vu certains travaux choisis, sachant que l'ensemble des travaux choisis sont ceux présentés dans la (section 3.3.2) du chapitre 3 de l'état de l'art, ce choix est dû à leur idée de développer des écosystèmes bactériens.

Comme décrit précédemment, un écosystème est un système décrit par des organismes, un environnement ainsi que les interactions existantes entre les deux. Le même principe est appliqué dans un écosystème bactérien. Tout système de bactéries qui réunit ces concepts est appelé écosystème bactérien, la raison du choix des travaux présentés dans le tableau est : D'abord les créatures de cet environnement (ou de l'écosystème) sont des bactéries qui sont des organismes unicellulaires. Elles sont attirées et repoussées par certains stimuli. Lorsque nous observons une bactérie dans son environnement, le comportement qu'elle développe est appelé chimiotaxie. Il existe des surfaces, sensorielles (réceptrices) et motrices (principalement des flagelles) au sein de la bactérie, reliées par une voie de signalisation, qui constitue un système dynamique complexe fortement lié à l'environnement. La chimiotaxie joue un rôle important dans la vie bactérienne, fournissant des bactéries avec la possibilité de rechercher rapidement un environnement de croissance optimal. Bien que les bactéries soient des organismes unicellulaires, elles ont la capacité d'agir de concert par la synthèse et la détection de petites molécules diffusantes auto-inductrices. Le phénomène, connu sous le nom de "quorum sensing", a surtout été proposé pour servir de moyen pour la mesure de la densité cellulaire. Le premier point en commun entre ces travaux et les notre réside dans le fait que le niveau de simulation est cellulaire, qui est considéré comme le modèle de base pour développer des comportements de populations, le même principe est à noter quant au type d'environnement de simulation, la totalité des travaux analysés ayant tous fait le choix d'espaces plats représentés par une grille 2D avec

des nutriments, des molécules, des toxines et autres...

Les modèles de simulations d'écosystèmes bactériens présentés ici (tableau 6.2) reposent sur l'étude des comportements individuels des bactéries, leur mouvement, leurs aptitudes (division, reproduction, ainsi que métabolisme) ainsi que leur façon de modéliser la voie des signaux venant de l'environnement (ex. chimiotaxie ou autres modèles). Par ailleurs, ils peuvent ou non utiliser des modèles métaboliques et un moyen de communication entre bactéries.

6.4 Bilan

Les différents points sur lesquels nous avons fait notre étude comparative ont mis en avant les points forts et les capacités offertes par nos deux modèles de développement de créatures artificielles dans des environnements artificiels, et ce, du fait qu'ils exploitent les points suivants : Prise en compte du métabolisme, la signalisation extracellulaire, de la production de déchets et/ou la diffusion de ces derniers dans l'environnement.

En conclusion, nous présentons à titre de récapitulatif une comparaison entre nos objectifs initiaux présentés dans cette thèse, ceux effectivement réalisés et ceux visés dans le futur immédiat en termes de perspectives et ce en termes de comportements évolués réalisés, d'environnement de simulation, et de résultats obtenus, etc.

En résumé, les points forts de nos modèles de simulation d'un écosystème artificiel relèvent du constat qu'ils traitent plusieurs des facteurs qui entrent dans la mesure d'un écosystème qui sont :

- L'utilisation de la sélection naturelle (modèle 1 de bactéries) où une fonction de fitness est utilisée (modèle 2 fourrageurs), pour évaluer et reproduire des mécanismes ;
- La survie qui est appliquée dans les deux modèles ;
- L'interaction avec l'environnement ;
- La communication et la compétition (prédateurs / proie) ;
- L'interaction entre les espèces (prédateurs / proies) ;
- L'émergence de comportements de population à partir d'un modèle de simulation cellulaire ;
- et finalement, une émergence de comportement d'échanges d'énergie et de matière.

Les points que l'on peut améliorer par rapport aux autres travaux de la littérature sont : L'utilisation du réseau de neurones qui peut être mieux contrôlable pour le contrôle des comportements de créatures artificielles adaptatives dans leurs environnements, d'une part. Mieux encore, et d'autre part, le développement d'un écosystème complet en 3D avec tous les types de créatures artificielles (voir perspectives pour plus de détails).

6.4. BILAN

Modèles	Aptitudes individuelles	Voie de signalisation	Activités de bactérie dans le modèle	Le métabolisme	La communication
BacSim [121]	Maintenir en vie, mouvements vers les nutriments, l'évitement des substances toxiques, la croissance et la libération contrôlée des ressources de signalisation	Simulation des propriétés bactérienne par un SMA	l'absorption de substrat, le métabolisme, la maintenance, la division cellulaire, la mort et la diffusion de substrat.	oui	Biofilms
Rubam [247]	Se reproduire et produire des ressources spécifiques afin de communiquer ensemble	des systèmes de classeurs d'apprentissage à base de règles	l'excitation et l'adaptation	oui	détection de quorum
RapidCell [248]	étudier la chimiotaxie dans différents gradients	chimiotaxie	clusters chémorécepteurs mixtes, la dynamique d'adaptation, et le mouvement tumbling	/	/
[177]	rechercher des éléments nutritifs et éviter le stress	série de réactions chimiques intracellulaires (chimie artificielle)	propriétés de signalétiques et mécaniques	oui	/
Ouannes [164]	Natation, se reproduire, survivre, division, métabolisme, diffuse des substrats moléculaires pour la communication.	Chimiotaxie	Modèle de récepteur, signalisation et moteur des flagelles	oui	Quorum Sensing

TABLE 6.2 – Table de synthèse et de comparaison entre des modèles de simulation d'écosystèmes bactériens.

Conclusion et Perspectives

7.1 Introduction

Dans la dernière partie de cette thèse, nous présentons la conclusion générale du travail effectué, et ce en étayant tout les points importants quant à nos modèles d'écosystèmes simulés. En perspectives, plutôt que de partir des limites des modèles que nous avons présentés dans les chapitres 4 et 5, pour mettre en exergue nos perspectives, nous avons plutôt choisi de faire différemment, puisque le gros des perspectives liées aux limites sont présentées dans le chapitre de l'étude comparative. Donc dans ce chapitre, nous ne présentons qu'une seule perspective, jugée la plus intéressante à même d'être réalisée, un modèle d'écosystème 3D, qui va essayer de répondre à toutes les insuffisances des modèles déjà présentés.

7.2 Conclusion Générale

Cette thèse suit la tendance et l'objectif de recréer des mécanismes et des phénomènes biologiques afin de mieux les comprendre et de surtout résoudre certains de leurs problèmes, et ce en utilisant une combinaison de modèles informatiques, mathématiques et physiques tout ceci dans le but d'observer, de modéliser et de comprendre l'interaction entre les animaux et leur environnement à des échelles très différentes ainsi qu'au niveau de l'organisation (cellulaire, organique ou écosystémique).

Dans un premier temps, nous avons implémenté un système artificiel (ou plateforme) permettant à des créatures artificielles d'apprendre comment utiliser leurs corps afin de se mouvoir dans leur environnement et d'atteindre des objectifs différents (ex. recherche de nourriture, poursuite d'une proie, et l'évasion d'un prédateur), sachant que cet environnement permet la simulation de la dynamique de corps rigides. Ces créatures artificielles obéissent aux lois physiques, à une fonction de fitness multi objective (pour les fourrageurs) ainsi qu'à des fonctions de fitness opposées (pour les prédateurs/proies). Le but principal étant de leur permettre de faire évoluer des comportements complexes à partir d'un simple contact avec l'environnement et avec le moins d'informations sur l'environnement. Ainsi, des aptitudes de marche dans un espace plat ont pu être réalisés par évolution donnant suite par émergence à des comportements plus délicats à partir de ses fonctions de fitness.

Ce système permet la génération de comportements de fourrages de créatures

artificielles articulées dans un environnement 3D physiquement simulé, ces créatures artificielles utilisent de l'énergie pour se déplacer (après avoir obtenu par évolution des capacités de locomotion réussie). Cependant, cette dépense d'énergie doit être optimisée afin de garantir toujours une haute disponibilité de l'énergie en plus des ressources absorbées. Le concept d'énergie peut être utilisé ensuite pour atteindre un seuil avec lequel les créatures vont se reproduire pour créer de nouvelles espèces plus fiables et plus efficaces (en exploitant uniquement les ressources disponibles dans l'environnement).

Ceci étant le modèle de développement de créatures à un niveau organique. Pour ce qui est du second niveau entamé, nous avons choisi le niveau cellulaire et comme créatures à développer, nous avons étudié les bactéries, en nous intéressant à leur mouvement, leur reproduction, et leurs capacités de survie. Un réseau de signalisation chimiotactique a été adopté afin de gérer le comportement d'entrée/sortie, et de simuler la natation des bactéries selon la disponibilité de nutriments dans leur milieu. Afin d'accomplir ce rôle, nous avons simulé dans un premier temps, la chimiotaxie bactérienne afin de mieux la comprendre quantitativement. Nous nous sommes, ensuite, attelés à comprendre et étudier le comportement de populations bactériennes dans leurs environnements, ainsi que le rôle des propriétés particulières du système dans des échelles de temps et d'espace (tel que la communication). Pour ce qui est de la communication, nous avons proposé un algorithme qui permet à ses bactéries, de se mouvoir dans leur environnement selon, tout d'abord, une disponibilité de ressources (par chimiotaxie). Cette capacité évolue ensuite lorsqu'un niveau de quorum est détecté, permettant aux bactéries de communiquer par diffusion d'une molécule AHL, dont le rôle est d'en indiquer les lieux les plus denses qui permettra de faire émerger par la suite un comportement de groupe à partir d'un simple comportement individuel.

La modélisation multi-échelle requiert une combinaison de modèles stochastiques et déterministes pour simuler des populations bactériennes en utilisant des modèles quantitatifs de cellules individuelles. La combinaison de ces méthodes nous a permis de construire un modèle très efficace.

7.3 Perspectives

7.3.1 Proposition d'un écosystème 3D

Nous proposons dans cette partie, un modèle intégral d'écosystème artificiel tridimensionnel avec différentes classes de créatures artificielles numériques, simulées en parallèle dans un même système et avec des paramètres et des conditions homogènes pour toutes les créatures. Le but étant d'étudier l'évolution des fonctions ou des comportements de ces créatures numériques d'une façon dépendante dans un environnement virtuel qui est similaire à un écosystème clos où l'échange de matière et d'énergie est assuré localement.

Ce modèle décrit un scénario de recherche de nourriture (ou de proies) classique (tel que présenté dans le chapitre 5), où la survie des créatures numériques dépend de leur capacité à acquérir et de gérer certaines ressources. De plus, nos créatures, afin de pouvoir se reproduire et évoluer vers à nouvelles espèces pour des alternatives de survie, ont besoin de trouver de la «nourriture» (par un fourragement ou par une prédation), et d'éviter les dangers (c.-à-d. améliorer leurs capacités défensives).

Ces créatures numériques sont constituées d'un corps virtuel et un contrôleur (par des réseaux de neurones) qui leur permettent de posséder des capacités de conscience

vis-à-vis de leur environnement et agir, en conséquence. Le corps d'une créature ainsi que son contrôleur sont constitués de composants très simples. Cependant, ces composants peuvent être modifiés lors de la reproduction. Ces créatures numériques peuvent être, des fourrageurs qui recherchent de la nourriture, disponible grâce à une fonction spécifique liée au fonctionnement d'un autre type de créatures (décomposeurs). Ces mêmes créatures de type fourrageurs, en plus d'avoir la capacité de faire évoluer leurs capacités de recherche de nourriture, doivent aussi améliorer leurs stratégies défensives, pour éviter de constituer une cible alimentaire pour d'autres créatures. Ces créatures numériques peuvent également être des créatures prédatrices, qui cherchent à trouver des proies afin de survivre et se reproduire.

Tout au long de l'expérience, un nombre spécifié de créatures numériques (que se soit des créatures de type fourrageurs (proies) ou des prédateurs) sont créées de façon aléatoire et placés dans l'environnement. Ces créatures aléatoires sont simples et n'ont aucune fonctionnalité spécifique. La plupart d'entre elles meurent après un court moment sans se reproduire du tout. Cependant, par la suite, d'une façon aléatoire, certaines d'entre elles vont trouver assez de nourriture et peuvent se reproduire. A partir de ce moment, le matériel génétique se voit transmis des parents vers les descendants et ainsi, l'évolution commence. La sélection favorise les créatures qui possèdent de meilleures capacités à trouver de la nourriture (sources de nourritures ou des proies), et éviter les dommages et qui suivent une bonne stratégie de reproduction.

D'un autre côté, les créatures du type décomposeur (ou les bactéries) qui sont modélisées par le biais d'un modèle chimiotactique, un algorithme génétique qui encode les capacités de détection de nutriments, un modèle métabolique qui gère le facteur d'énergie, ainsi qu'un modèle de communication, peuvent jouer un rôle très important dans cet écosystème tridimensionnel de créatures artificielles. Ainsi, ces bactéries simulées doivent décomposer de la matière morte rejetée par les autres créatures (que se soit des déchets ou des créatures mortes). Cette fonctionnalité peut être réalisée par le biais d'une équation qui équilibre le transfert énergétique ou la biomasse de l'écosystème, ce qui requiert des informations détaillées sur toutes les fonctionnalités des autres créatures. En sortie, ces créatures de type décomposeur, comme mentionné ci-dessus, doivent influencer sur la disponibilité des ressources dans l'environnement (de cette façon, les ressources vont être fournies selon un fonctionnement préétabli et dépendant de toutes les fonctionnalités des autres créatures).

Un système tout entier avec ses différentes créatures forme un cycle d'échange de matière et d'énergie au cours du temps. Les réactions chimiques intercellulaires forment un milieu homogène de l'ensemble des concentrations de protéines données par le modèle d'équations différentielles qui expriment un phénomène se produisant à l'intérieur de la cellule.

Tout ceci permettra d'accomplir ce rôle et offrira la potentialité de modéliser cet écosystème avec ses différentes créatures artificielles qui se développent d'une façon dépendante les unes des autres, permettant de fournir par la suite des données qui analysent la dynamique des populations et des espèces obtenues. Nous devons cependant, répondre à certaines interrogations dont nous citons les plus pertinentes :

1. Quelles créatures allons-nous modéliser dans ce système ?
2. Quelles dimensions devrions-nous considérer pour gérer leurs mouvements dans le simulateur (2D ou 3D) ?
3. Quelle taille faut-il leur donner ?

4. Comment homogénéiser leur taux de reproduction (du fait que les créatures bactériennes se reproduisent très rapidement par rapport aux autres créatures).

Les suggestions pour répondre à ses interrogations sont les suivantes : Tout d'abord, les bactéries se déplacent en 2D (x et y), leurs mouvements sont dépendants de leurs flagelles. Les changements de leurs coordonnées x et y (déplacement en 2D) s'effectuent selon une contribution statique définie par le modèle de chimiotaxie (sortie du réseau chimiotactique qui est un mode de locomotion 'run' ou 'tumble'). Ces créatures bactériennes seraient disposées sur le sol et absorberaient les nutriments venant d'autres créatures.

Des réactions chimiques intercellulaires permettent au modèle bactérien de former un milieu intercellulaire homogène, et ce, à partir des concentrations de protéines gérées par l'ensemble des équations différentielles.

Par ailleurs, la simulation des bactéries peut être améliorée, en passant d'une représentation bidimensionnelle à une représentation tridimensionnelle sans que le comportement obtenu auparavant ne change. Et de cette manière, nous pouvons répondre à la seconde interrogation.

Pour les créatures de type fourrageurs, prédatrices et proies, elles sont de taille normale, alors que les bactéries devraient être agrandies (d'un point de vue graphique) pour pouvoir tout visualiser en parallèle dans un même environnement. La même remarque peut être faite quant au fonctionnement des bactéries ; leur nombre sera revu à la baisse (en fonction de la vitesse de reproduction). Ainsi, au lieu d'utiliser des milliards de bactéries, nous utilisons des centaines, mais qui permettent de réaliser la même expérimentation. Ceci a pour impératif l'unification de l'échelle. De cette manière, nous pouvons étudier leurs comportements pour former des cycles de transfert d'énergie ou de matière depuis, respectivement, vers les sources (qui peuvent être des plantes), vers des créatures du type fourrageur, vers des prédateurs, et à nouveau vers des bactéries.

Une autre contrainte très importante à prendre en considération dans une telle simulation est celle du temps de fonctionnement (ou de réponse) de chaque créature qui se déplace dans l'environnement en accomplissant des rôles entre les créatures de même espèce et entre les créatures de types différents. Le transfert qui se fera entre chaque espèce et une autre demande une échelle de simulation unifiée (c.-à-d. un temps de simulation homogène). Pour remédier à ce type de contrainte, nous proposons ainsi de modifier le temps de réponse des bactéries et le temps (ou le taux) de reproduction.

En récapitulatif, nous devons faire mouvoir toutes les créatures artificielles de la même façon (dimension, taille, échelle et temps). Il faut également savoir synchroniser les comportements de chaque créature d'une espèce donnée par rapport aux comportements des autres créatures. Prenons par exemple des créatures de type fourrageur, qui cherchent à s'alimenter tout en évitant d'être prises pour cible et consommées par une autre espèce, les prédateurs doivent à leur tour chercher des proies. La recherche de nourriture est le comportement de base de chaque créature, à partir de ce comportement chaque créature d'une classe donnée doit pouvoir fournir ce qu'il faut pour les créatures de la deuxième classe, c.-à-d. leurs processus métaboliques devront être fortement liés (la consommation de la matière fournie par les autres créatures) formant ainsi une chaîne alimentaire.

Le dernier point à prendre en considération est celui de la nature de l'environnement (terrestre ou aquatique), cet environnement requiert soit des créatures qui marchent (ou nagent), voire les deux à la fois. Ainsi, nous avons le choix entre des bactéries qui nagent ou qui marchent. L'espace plat que nous avons utilisé avant reste un choix loin de la réalité,

7.3. PERSPECTIVES

alors que choisir un terrain accidenté devrait répondre d'une manière plus adéquate à cette contrainte.

Dans la figure 7.1 des perspectives, nous proposons le schéma général de la simulation d'un écosystème 3D intégral avec toutes les classes de créatures artificielles présentes.

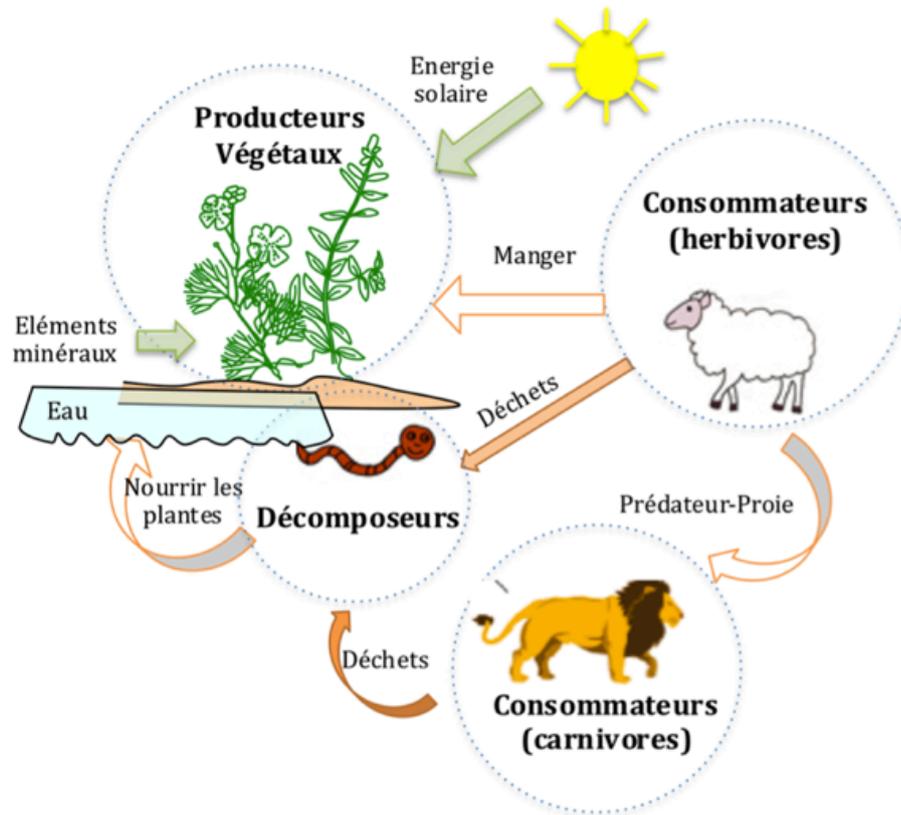


FIGURE 7.1 – Le cycle de transfert de l'énergie dans un écosystème.

Bibliographie

- [1] Goryachev AB, Toh DJ, and Lee T. Systems analysis of a quorum sensing network : design constraints imposed by the functional requirements, network topology and kinetic constants. *Bio Systems*, 83 :178–87, 2006.
- [2] Peter A Abrams. The evolution of predator-prey interactions : theory and evidence. *Annual Review of Ecology and Systematics*, pages 79–105, 2000.
- [3] C Adami. Ab initio modeling of ecosystems with artificial life. *Natural Resource Modeling*, 15(1) :133–145, 2002.
- [4] Chris Adami. Learning and complexity in genetic auto-adaptive systems. Technical report, 1993.
- [5] Chris Adami and C Titus Brown. Evolutionary learning in the 2d artificial life system ‘avida’. In *Artificial life IV*, volume 1194, pages 377–381. Cambridge, MA : MIT Press, 1994.
- [6] Christoph Adami. What is complexity? *BioEssays*, 24(12) :1085–1094, 2002.
- [7] Christoph Adami, Charles Ofria, and Travis C Collier. Evolution of biological complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9) :4463–4468, 2000.
- [8] Bryan Adams, Cynthia Breazeal, Rodney A Brooks, and Brian Scassellati. Humanoid robots : a new kind of tool. *Intelligent Systems and Their Applications, IEEE*, 15(4) :25–31, 2000.
- [9] J. Adler. Chemotaxis in bacteria. *Annual Review of Biochemistry*, 44 :341–356, 1975.
- [10] Julius Adler. Chemotaxis in bacteria. *Science*, 153(3737) :708–716, 1966.
- [11] Anurag A Agrawal. Phenotypic plasticity in the interactions and evolution of species. *Science*, 294(5541) :321–326, 2001.
- [12] W Brian Arthur, Steven N Durlauf, and David A Lane. *The economy as an evolving complex system II*, volume 28. Addison-Wesley Reading, MA, 1997.
- [13] Joshua E Auerbach and Josh C Bongard. Dynamic resolution in the co-evolution of morphology and control. In *Artificial Life XII : Proceedings of the Twelfth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, number EPFL-CONF-191277, pages 451–458. MIT Press, 2010.
- [14] N Barkal and Stanislas Leibler. Robustness in simple biochemical networks. *Nature*, 387(6636) :913–917, 1997.

- [15] Bonnie L Bassler and Richard Losick. Bacterially speaking. *Cell*, 125(2) :237–246, 2006.
- [16] AMBERA BEAUDRY and GERALDF JOYCE. Directed evolution of an rna enzyme. *Science*, 257(5070) :635–641, 1992.
- [17] Andrew P Beckerman, Maria Uriarte, and Oswald J Schmitz. Experimental evidence for a behavior-mediated trophic cascade in a terrestrial food chain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(20) :10735–10738, 1997.
- [18] MA Bedau. Supple laws in biology and psychology. *Where biology meets psychology : philosophical essays (Cambridge : MIT Press) pp*, pages 287–302, 1999.
- [19] Mark Bedau. Downward causation and the autonomy of weak emergence. *Principia : an international journal of epistemology*, 6(1) :5–50, 2002.
- [20] Mark A Bedau. The nature of life. *The philosophy of artificial life*, pages 332–357, 1996.
- [21] Mark A Bedau. Emergent models of supple dynamics in life and mind. *Brain and Cognition*, 34(1) :5–27, 1997.
- [22] Mark A Bedau. Weak emergence. *Noûs*, 31(s11) :375–399, 1997.
- [23] Mark A Bedau. Four puzzles about life. *Artificial Life*, 4(2) :125–140, 1998.
- [24] Mark A Bedau and Paul Ed Humphreys. *Emergence : Contemporary readings in philosophy and science*. MIT press, 2008.
- [25] Mark A Bedau, John S McCaskill, Norman H Packard, Steen Rasmussen, Chris Adami, David G Green, Takashi Ikegami, Kunihiro Kaneko, and Thomas S Ray. Open problems in artificial life. *Artificial life*, 6(4) :363–376, 2000.
- [26] Randall D Beer et al. Toward the evolution of dynamical neural networks for minimally cognitive behavior. *From animals to animats*, 4 :421–429, 1996.
- [27] Michael Begon, Colin R Townsend, and John L Harper. *Ecology : from individuals to ecosystems*. 2006.
- [28] Nour EL-Houda Benalia, Nesrine Ouannes, and Noureddine Djedi. Implementation of an improved parallel metaheuristic on gpu applied to humanoid robot simulation. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference on*, pages 42–47. IEEE, 2014.
- [29] Howard C Berg. Motile behavior of bacteria. *Physics Today*, 53(1) :24–30, 2000.
- [30] Howard C Berg. *E. coli in Motion*. Springer, 2003.
- [31] Howard C Berg, Douglas A Brown, et al. Chemotaxis in escherichia coli analysed by three-dimensional tracking. *Nature*, 239(5374) :500–504, 1972.
- [32] Claude Bernard. *Anesthésiques et l’asphexie*. Paris :Balière, 1985.
- [33] R. Berry, W. Rungtarityotin, P. Dorin, A. Dahlstedt, and C. Haw. Unfinished symphonies - songs of 3 1/2 worlds. In *Artificial Life Models for Musical Applications, Bilotta et al (eds), ECAL 2001 Prague, Editoriale Bios*, pages 51–64, 2001.
- [34] Bruce M Blumberg and Tinsley A Galyean. Multi-level direction of autonomous creatures for real-time virtual environments. pages 47–54. ACM, 1995.
- [35] Josh Bongard. *Incremental approaches to the combined evolution of a robot’s body and brain*. 2003.

- [36] André Brack. Où est née la vie? l'alchimie de l'origine de la vie. *Dossier Pour la Science*, 60, juillet - septembre 2008.
- [37] Dennis Bray, Robert B Bourret, and Melvin I Simon. Computer simulation of the phosphorylation cascade controlling bacterial chemotaxis. *Molecular Biology of the Cell*, 4(5) :469, 1993.
- [38] Dennis Bray, Matthew D Levin, and Karen Lipkow. The chemotactic behavior of computer-based surrogate bacteria. *Current biology*, 17(1) :12–19, 2007.
- [39] Rodney Brooks. The relationship between matter and life. *Nature*, 409(6818) :409–411, 2001.
- [40] Rodney A Brooks. How to build complete creatures rather than isolated cognitive simulators. *Architectures for intelligence*, pages 225–239, 1991.
- [41] Douglas A Brown and Howard C Berg. Temporal stimulation of chemotaxis in escherichia coli. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 71(4) :1388–1392, 1974.
- [42] Gunnar Buason, Nicklas Bergfeldt, and Tom Ziemke. Brains, bodies, and beyond : Competitive co-evolution of robot controllers, morphologies and environments. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 6(1) :25–51, 2005.
- [43] Gunnar Búason and Tom Ziemke. Competitive co-evolution of predator and prey sensory-motor systems. In *Applications of Evolutionary Computing*, pages 605–615. Springer, 2003.
- [44] Susan M Butler and Andrew Camilli. Going against the grain : chemotaxis and infection in vibrio cholerae. *Nature Reviews Microbiology*, 3(8) :611–620, 2005.
- [45] Cox CD, Peterson GD, Allen MS, Lancaster JM, McCollum JM, and et al. Analysis of noise in quorum sensing. *OMICS*, 7 :317–34, 2003.
- [46] Alastair Daniel Channon and Robert I Damper. Towards the evolutionary emergence of increasingly complex advantageous behaviours. *International Journal of Systems Science*, 31(7) :843–860, 2000.
- [47] Alfred Chapuis and Edouard Gélis. Le monde des automates, 2 vols. *Paris*, 2 :309, 1928.
- [48] Nicolas Chaumont and Christoph Adami. Potential and promise of open-ended evolution in artificial life. In *ALIFE*, pages 429–430, 2010.
- [49] Nicolas Chaumont and Christoph Adami. Evolution of sustained foraging in 3d environments with physics. *arXiv preprint arXiv :1112.5116*, 2011.
- [50] Nicolas Chaumont, Richard Egli, and Christoph Adami. Evolving virtual creatures and catapults. *Artificial Life*, 13(2) :139–157, 2007.
- [51] Harris Chi Ho Chiu, Michael Rubenstein, and Wei-Min Shen. "deformable wheel"—a self-recovering modular rolling track. In *Distributed Autonomous Robotic Systems 8*, pages 429–440. Springer, 2009.
- [52] Dave Cliff, Phil Husbands, and Inman Harvey. Explorations in evolutionary robotics. *Adaptive Behavior*, 2(1) :73–110, 1993.
- [53] Dave Cliff and Geoffrey F Miller. Co-evolution of pursuit and evasion ii : Simulation methods and results. 1995.

- [54] Philippe Cluzel, Michael Surette, and Stanislas Leibler. An ultrasensitive bacterial motor revealed by monitoring signaling proteins in single cells. *Science*, 287(5458) :1652–1655, 2000.
- [55] Alan Code and JME Moravcsik. *Explaining various forms of living*. Oxford University Press, 1992.
- [56] Michael Conrad and HH Pattee. Evolution experiments with an artificial ecosystem. *Journal of Theoretical Biology*, 28(3) :393–409, 1970.
- [57] Robert Davidge. Looping as a means to survival : Playing russian roulette in a harsh environment. *Self organization and life : from simple rules to global complexity, Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life*, 1993.
- [58] Richard Dawkins. The blind watchmaker, harlow. *Longman*, 32 :361–391, 1986.
- [59] Hugo De Garis. Genetic programming-building artificial nervous systems with genetically programmed neural network modules. 1990.
- [60] Donald Lee DeAngelis, Louis J Gross, et al. *Individual-based models and approaches in ecology : populations, communities and ecosystems*. Chapman & Hall, 1992.
- [61] Daniel C Dennett. *Darwin's Dangerous Idea : Evolution and the Meanings of Life*. Number 39. SimonandSchuster. com, 1996.
- [62] Daniel C Dennett. *Kinds of minds : Towards an understanding of consciousness (science masters s.)*. 1996.
- [63] Hugh Dingle and V Alistair Drake. What is migration ? *Bioscience*, 57(2) :113–121, 2007.
- [64] A. Dorin. Software sketches. *SIAL Colloquium, Spatial Information Architecture Laboratory, RMIT University, Australia,*, Sept 2002.
- [65] A. Dorin. Meniscus. in *experimenta : House of tomorrow catalogue*. Taylor (ed.), *Experimenta Media Arts, Australia,*, page 32, 2003.
- [66] Alan Dorin. Aesthetic fitness and artificial evolution for the selection of imagery from the mythical infinite library. In *Advances in artificial life*, pages 659–668. Springer, 2001.
- [67] Alan Dorin. The virtual ecosystem as generative electronic art. In *Applications of Evolutionary Computing*, pages 467–476. Springer, 2004.
- [68] Alan Dorin. Habitat : Engineering in a simulated audible ecosystem. *M. Giacobini et al. (Eds.) : EvoWorkshops 2009, LNCS 5484. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009*, (488–497), 2009.
- [69] Alan Dorin and Kevin B Korb. Building virtual ecosystems from artificial chemistry. In *Advances in Artificial Life*, pages 103–112. Springer, 2007.
- [70] Malcolm Edmunds. *Defence in animals : a survey of anti-predator defences*. Longman Harlow, 1974.
- [71] Manfred Eigen. Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften*, 58(10) :465–523, 1971.
- [72] Manfred Eigen and Peter Schuster. *The hypercycle, a principle of natural self-organization*, volume 92. Springer Berlin Heidelberg, New York, 1979.
- [73] L.J. Elman. Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14 :179–211, 1990.

- [74] Thierry Emonet and Philippe Cluzel. Relationship between cellular response and behavioral variability in bacterial chemotaxis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(9) :3304–3309, 2008.
- [75] Robert G Endres and Ned S Wingreen. Precise adaptation in bacterial chemotaxis through “assistance neighborhoods”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(35) :13040–13044, 2006.
- [76] Joshua M Epstein. *Growing artificial societies : social science from the bottom up*. Brookings Institution Press, 1996.
- [77] J. Erdei, M. Joachimczak, and B. Wróbel. Evolution of chemotaxis in single-cell artificial organisms. In *Proceedings of ICT Young, Gdansk University of Technology, Poland*, (185–190), 2012.
- [78] Joachim Erdei, Michal Joachimczak, and Borys Wróbel. Evolving gene regulatory networks controlling foraging strategies of prey and predators in an artificial ecosystem. In *Advances in Artificial Life, ECAL*, volume 12, pages 531–537, 2013.
- [79] Joachim Erdei and Borys Wróbel. Evolution of animats following a moving target in an artificial ecosystem. In *ALIFE 14 : The Fourteenth Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, volume 14, pages 98–104.
- [80] J Farmer. Doyne and belin, alletta d’a. *Artificial life : The coming evolution*. In *Langton, Christopher, Taylor, Charles, Farmer, J. Doyne, and Rasmussen, Steen (editors). Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity*, 10 :815–838, 1992.
- [81] Dario Floreano and Stefano Nolfi. Adaptive behavior in competing co-evolving species. In *4th European Conference on Artificial Life*, pages 378–387, 1997.
- [82] Stephanie Forrest and Terry Jones. Modeling complex adaptive systems with echo. *Complex Systems : Mechanisms of Adaptation, (Ed. RJ Stonier and XH Yu)*, IOS press, pages 3–21, 1994.
- [83] W Claiborne Fuqua, Stephen C Winans, and E Peter Greenberg. Quorum sensing in bacteria : the luxr-luxI family of cell density-responsive transcriptional regulators. *Journal of bacteriology*, 176(2) :269, 1994.
- [84] Martin Gardner. Mathematical games : The fantastic combinations of john conway’s new solitaire game “life”. *Scientific American*, 223(4) :120–123, 1970.
- [85] SJ Gould. *Wonderful life : The burgess shale and then nature of history*, 1989.
- [86] Laura M Grabowski, Wesley R Elsberry, Charles Ofria, and Robert T Pennock. On the evolution of motility and intelligent tactic response. *Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 209–216, 2008.
- [87] Nuno Gracias, Henrique Pereira, José Allen Lima, and Agostinho Rosa. Gaia : An artificial life environment for ecological systems simulation. In *Artificial Life V*, pages 124–134, 1997.
- [88] Robin Gras, Didier Devaurs, Adrianna Wozniak, and Adam Aspinall. An individual-based evolving predator-prey ecosystem simulation using a fuzzy cognitive map as the behavior model. *Artificial life*, 15(4) :423–463, 2009.
- [89] Virgil Griffith and Larry S Yaeger. Ideal free distribution in agents with evolved neural architectures. *L. e. a. Rocha (ed.), Artificial Life X, MIT Press, Cambridge, MA.*, 2006.

- [90] Clinton H Hansen, Robert G Endres, and Ned S Wingreen. Chemotaxis in *Escherichia coli* : a molecular model for robust precise adaptation. *PLoS computational biology*, 4(1) :e1, 2008.
- [91] S. Haykin. *Neural networks : A comprehensive foundation*,. 2nd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.
- [92] Jean-Claude Heudin. Vw'98 : virtual worlds(paris, 1-3 july 1998). *Lecture notes in computer science*, pages 1–28.
- [93] Ricardo M Hoar, Joanne K Penner, and Christian Jacob. Transcription and evolution of a virtual bacteria culture. *Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on*, 1 :54–61, 2003.
- [94] Paulien Hogeweg. Mirror beyond mirror : Puddles of life. In *ALIFE*, pages 297–316, 1987.
- [95] John H Holland. *Adaptation in natural and artificial systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, 1975.
- [96] Marcel Holyoak, Renato Casagrandi, Ran Nathan, Eloy Revilla, and Orr Spiegel. Trends and missing parts in the study of movement ecology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(49) :19060–19065, 2008.
- [97] Michael Huston, Donald DeAngelis, and Wilfred Post. New computer models unify ecological theory. *BioScience*, pages 682–691, 1988.
- [98] Tim J Hutton. Evolvable self-reproducing cells in a two-dimensional artificial chemistry. *Artificial life*, 13(1) :11–30, 2007.
- [99] T Ito, ML Pilat, R Suzuki, and T Arita. Emergence of defensive strategies based on predator-prey co-evolution in 3d physical simulation. In *Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), 2012 Joint 6th International Conference on*, pages 890–895. IEEE, 2012.
- [100] Takashi Ito, Marcin Pilat, Reiji Suzuki, and Takaya Arita. Coevolutionary dynamics caused by asymmetries in predator-prey and morphology-behavior relationships. In *Advances in Artificial Life, ECAL*, volume 12, pages 439–445, 2013.
- [101] Takashi Ito, Marcin L Pilat, Reiji Suzuki, and Takaya Arita. Population and evolutionary dynamics based on predator-prey relationship in 3d physical simulation. In *ALIFE 14 : The Fourteenth Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, volume 14, pages 105–112.
- [102] Takashi Ito, Marcin L Pilat, Reiji Suzuki, and Takaya Arita. Alife approach for body-behavior predator-prey coevolution : body first or behavior first? *Artificial Life and Robotics*, 18(1-2) :36–40, 2013.
- [103] Kenji Iwadate, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa. Evolving amphibian behavior in complex environment. In *Advances in Artificial Life. Darwin Meets von Neumann*, pages 107–114. Springer, 2011.
- [104] Guangyong Ji, Ronald C Beavis, and Richard P Novick. Cell density control of staphylococcal virulence mediated by an octapeptide pheromone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(26) :12055–12059, 1995.

- [105] Michal Joachimczak, Taras Kowaliw, René Doursat, and Borys Wróbel. Brainless bodies : controlling the development and behavior of multicellular animats by gene regulation and diffusive signals. In *Artificial life*, volume 13, pages 349–356, 2012.
- [106] Michal Joachimczak and Borys Wróbel. Evo-devo in silico-a model of a gene network regulating multicellular development in 3d space with artificial physics. In *ALIFE*, pages 297–304, 2008.
- [107] Michal Joachimczak and Borys Wróbel. Evolving gene regulatory networks for real time control of foraging behaviours. In *ALIFE*, pages 348–358, 2010.
- [108] Michał Joachimczak and Borys Wróbel. Co-evolution of morphology and control of soft-bodied multicellular animats. In *Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference*, pages 561–568. ACM, 2012.
- [109] Williams JW, Cui X, Levchenko, and Stevens AM. Robust and sensitive control of a quorum-sensing circuit by two interlocked feedback loops. *Mol Syst Biol*, 4(234), 2008.
- [110] George Kampis. Life-like computing beyond the machine metaphor. *Computing with biological metaphors*, London : Chapman and Hall. Contact : gk@cfnext.physchem.chemie.uni-tuebingen.de, 1993.
- [111] HEIDI B Kaplan and EP Greenberg. Diffusion of autoinducer is involved in regulation of the vibrio fischeri luminescence system. *Journal of Bacteriology*, 163(3) :1210–1214, 1985.
- [112] Francis X Kelly, Karen J Dapsis, and Douglas A Lauffenburger. Effect of bacterial chemotaxis on dynamics of microbial competition. *Microbial Ecology*, 16(2) :115–131, 1988.
- [113] Michael J Kennedy. Role of motility, chemotaxis, and adhesion in microbial ecology. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 506(1) :260–273, 1987.
- [114] Michael J Kennedy and James G Lawless. Role of chemotaxis in the ecology of denitrifiers. *Applied and environmental microbiology*, 49(1) :109–114, 1985.
- [115] David Kentner and Victor Sourjik. Spatial organization of the bacterial chemotaxis system. *Current Opinion in Microbiology*, 9(6) :619–624, 12 2006.
- [116] Juan E Keymer, Robert G Endres, Monica Skoge, Yigal Meir, and Ned S Wingreen. Chemosensing in escherichia coli : two regimes of two-state receptors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(6) :1786–1791, 2006.
- [117] Jaegwon Kim. Making sense of emergence. *Philosophical studies*, 95(1) :3–36, 1999.
- [118] Markus Kollmann, Linda Løvdok, Kilian Bartholomé, Jens Timmer, and Victor Sourjik. Design principles of a bacterial signalling network. *Nature*, 438(7067) :504–507, 2005.
- [119] Maciej Komosiński and Szymon Ulatowski. Framsticks : Towards a simulation of a nature-like world, creatures and evolution. In *Advances in Artificial Life*, pages 261–265. Springer, 1999.
- [120] John R Koza. Evolution and co-evolution of computer programs to control independently-acting agents. *Meyer and Wilson*, 1568 :366–375, 1991.

- [121] Jan-Ulrich Kreft, Ginger Booth, and Julian WT Wimpenny. Bacsim, a simulator for individual-based modelling of bacterial colony growth. *Microbiology*, 144(12) :3275–3287, 1998.
- [122] Christopher G Langton and CC Langton. Artificial life, santa fe institute studies on the sciences of complexity. *Proc*, 6, 1989.
- [123] Nicolas Lassabe. *Morphogenese et Evolution de Creatures Artificielles*. PhD thesis, Université de Toulouse 1, 2008.
- [124] Nicolas Lassabe, Herve Luga, and Yves Duthen. Evolving creatures in virtual ecosystems. In *Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, pages 11–20. Springer, 2006.
- [125] Douglas A Lauffenburger. Quantitative studies of bacterial chemotaxis and microbial population dynamics. *Microbial Ecology*, 22(1) :175–185, 1991.
- [126] Pierre Legreneur, Michel Laurin, and Vincent Bels. Predator–prey interactions paradigm : a new tool for artificial intelligence. *Adaptive Behavior*, 20(1) :3–9, 2012.
- [127] Richard E Lenski, Charles Ofria, Travis C Collier, and Christoph Adami. Genome complexity, robustness and genetic interactions in digital organisms. *Nature*, 400(6745) :661–664, 1999.
- [128] Richard E Lenski, Charles Ofria, Robert T Pennock, and Christoph Adami. The evolutionary origin of complex features. *Nature*, 423(6936) :139–144, 2003.
- [129] Matthew D Levin, Carl J Morton-Firth, Walid N Abouhamad, Robert B Bourret, and Dennis Bray. Origins of individual swimming behavior in bacteria. *Biophysical journal*, 74(1) :175–181, 1998.
- [130] Mingshan Li and Gerald L Hazelbauer. Cellular stoichiometry of the components of the chemotaxis signaling complex. *Journal of bacteriology*, 186(12) :3687–3694, 2004.
- [131] Hod Lipson and Jordan B Pollack. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms. *Nature*, 406(6799) :974–978, 2000.
- [132] Andrei Lupas and Jeff Stock. Phosphorylation of an n-terminal regulatory domain activates the cheb methylesterase in bacterial chemotaxis. *Journal of Biological Chemistry*, 264(29) :1989, 1989.
- [133] Robert M Macnab and Daniel E Koshland Jr. The gradient-sensing mechanism in bacterial chemotaxis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69(9) :2509–2512, 1972.
- [134] L. Margulis and M. F Dolan. Early life. In *2nd edn, Jones and Bartlett Publishers, Inc.*, 2002.
- [135] John Maynard Smith and Eors Szathmary. The major transitions in evolution. *D Reidel Pub Co*, 1995.
- [136] Ernst Mayr. Evolution and the diversity of life : Selected essays, cambridge, mass. and london : Belknap. *Harvard University Press*, 1976.
- [137] Ernst Mayr. *The growth of biological thought : diversity, evolution and inheritance*. Harvard University Press, 1982.

- [138] Harley H. McAdams, Balaji Srinivasan, and Adam P. Arkin. The evolution of genetic regulatory systems in bacteria. *Nat Rev Genet*, 5(3) :169–178, 03 2004.
- [139] Jon McCormack. Eden : An evolutionary sonic ecosystem. In *Advances in Artificial Life*, pages 133–142. Springer, 2001.
- [140] Jon McCormack. Evolving sonic ecosystems. *Kybernetes*, 32(1/2) :184–202, 2003.
- [141] Jon McCormack. Artificial ecosystems for creative discovery. In *Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 301–307. ACM, 2007.
- [142] Jon McCormack. Creative ecosystems. In *Computers and Creativity*, pages 39–60. Springer, 2012.
- [143] Megan M. McEvoy, Anat Bren, Michael Eisenbach, and Frederick W. Dahlquist. Identification of the binding interfaces on chey for two of its targets the phosphatase chez and the flagellar switch protein flim. *Journal of Molecular Biology*, 289(5) :1423–1433, 6 1999.
- [144] Taga ME and Bassler BL. Chemical communication among bacteria. *Proc Natl Acad Sci USA* 100, 2 :14549–54, 2003.
- [145] Radomír Měch and Przemyslaw Prusinkiewicz. Visual models of plants interacting with their environment. pages 397–410. ACM, 1996.
- [146] Bernardo A Mello and Yuhai Tu. Perfect and near-perfect adaptation in a model of bacterial chemotaxis. *Biophysical journal*, 84(5) :2943, 2003.
- [147] Bernardo A Mello and Yuhai Tu. An allosteric model for heterogeneous receptor complexes : understanding bacterial chemotaxis responses to multiple stimuli. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(48) :17354–17359, 2005.
- [148] Marc Métivier, Claude Lattaud, and Jean-Claude Heudin. A stress-based speciation model in lifedrop. In *Artificial life VIII : Proceedings of the Eighth International Conference on Artificial Life*, pages 121–126, 2003.
- [149] Thomas Miconi. Evosphere : evolutionary dynamics in a population of fighting virtual creatures. In *Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. *IEEE Congress on*, pages 3066–3073. IEEE, 2008.
- [150] Thomas Miconi. In silicon no one can hear you scream : Evolving fighting creatures. In *Genetic Programming*, pages 25–36. Springer, 2008.
- [151] Thomas Miconi and Alastair Channon. Analysing co-evolution among artificial 3d creatures. In *Artificial Evolution*, pages 167–178. Springer, 2006.
- [152] Melissa B Miller and Bonnie L Bassler. Quorum sensing in bacteria. *Annual Reviews in Microbiology*, 55(1) :165–199, 2001.
- [153] Melanie Mitchell and Charles E Taylor. Evolutionary computation : an overview. *Annual Review of Ecology and Systematics*, pages 593–616, 1999.
- [154] Carl Jason Morton-Firth and Dennis Bray. Predicting temporal fluctuations in an intracellular signalling pathway. *Journal of Theoretical Biology*, 192(1) :117–128, 1998.

- [155] Nathan Muchhala and James D Thomson. Going to great lengths : selection for long corolla tubes in an extremely specialized bat–flower mutualism. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, pages rspb–2009, 2009.
- [156] Thomas Mueller and William F Fagan. Search and navigation in dynamic environments—from individual behaviors to population distributions. *Oikos*, 117(5) :654–664, 2008.
- [157] Kenneth H Neelson, Terry Platt, and J Woodland Hastings. Cellular control of the synthesis and activity of the bacterial luminescent system. *Journal of bacteriology*, 104(1) :313–322, 1970.
- [158] Stefano Nolfi and Dario Floreano. Coevolving predator and prey robots : Do “arms races” arise in artificial evolution? *Artificial life*, 4(4) :311–335, 1998.
- [159] Stefano Nolfi and Dario Floreano. *Evolutionary robotics : The biology, intelligence, and technology of self-organizing machines*, volume 26. MIT press Cambridge, 2000.
- [160] Stefano Nolfi and Dario Floreano. Synthesis of autonomous robots through evolution. *Trends in cognitive sciences*, 6(1) :31–37, 2002.
- [161] Charles Ofria and Claus O Wilke. Avida : A software platform for research in computational evolutionary biology. *Artificial life*, 10(2) :191–229, 2004.
- [162] Ryosuke Ooe, Ikuo Suzuki, Masahito Yamamoto, and Masashi Furukawa. Study on evolution of the artificial flying creature controlled by neuro-evolution. *Artificial Life and Robotics*, 17(3-4) :470–475, 2013.
- [163] N. Ouannes, N.Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Gait evolution for humanoid robot in a physically simulated environment. *in : Intelligent Computer Graphics 2011 book. Dimitri Plemenos, Georgios Miaouis (Eds.), SCI 374, .*, pages 157–173, 2011.
- [164] N. Ouannes, N.Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Modeling a bacterial ecosystem through chemotaxis simulation of a single cell. *AROB Journal Springer Japan*, 19(4) :382–387, 2014.
- [165] N. Ouannes, N.Djedi, Y. Duthen, and H. Luga. Modeling a bacterial ecosystem through chemotaxis simulation of a single cell. *The Nineteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2014 (AROB), B-Con Plaza, Beppu, Japan, January 2014*.
- [166] Nesrine Ouannes, Nouredine Djedi, Yves Duthen, and H Luga. Toward the construction of a virtual ecosystem by evolving virtual creature’s behaviours. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2012 International Conference on*, pages 350–355. IEEE, 2012.
- [167] Nesrine Ouannes, Nouredine Djedi, Yves Duthen, and Herve Luga. Following food sources by artificial creature in a virtual ecosystem. *VIRTUAL WORLDS - Artificial Ecosystems and Digital Art Exploration*, pages 99–116, 2012.
- [168] Nesrine Ouannes, Nouredine Djedi, Herve Luga, and Yves Duthen. Modeling bacterial chemotaxis inside a cell. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference on*, pages 32–37. IEEE, 2014.
- [169] Michael E Palmer. Evolved neurogenesis and synaptogenesis for robotic control : the l-brain model. In *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 1515–1522. ACM, 2011.

- [170] Michael E Palmer and Andrew K Chou. An artificial visual cortex drives behavioral evolution in co-evolved predator and prey robots. In *Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference companion*, pages 361–364. ACM, 2012.
- [171] Bernhard Palsson et al. The challenges of in silico biology. *Nature biotechnology*, 18(11) :1147–1150, 2000.
- [172] David Panzoli. *Proposition de l'architecture "Cortexionist" pour l'intelligence comportementale de créatures artificielles*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [173] Howard H Pattee. Simulations, realizations, and theories of life. pages 63–78, 1987.
- [174] Anton Pauw, Jaco Stofberg, and Richard J Waterman. Flies and flowers in darwin's race. *Evolution*, 63(1) :268–279, 2009.
- [175] Seed PC, Passador L, and Iglewski BH. Activation of the pseudomonas aeruginosa lasi gene by lasr and the pseudomonas autoinducer pai : An autoinduction regulatory hierarchy. *J bacteriol.* (177) :654 – 659, 1995.
- [176] Scott D Peacor, Stefano Allesina, Rick L Riolo, and Tim S Hunter. A new computational system, dove (digital organisms in a virtual ecosystem), to study phenotypic plasticity and its effects in food webs. *Ecological modelling*, 205(1) :13–28, 2007.
- [177] Joanne Penner, Ricardo Hoar, and Christian Jacob. Modelling bacterial signal transduction pathways through evolving artificial chemistries. In *The First Australian Conference on artificial Life, Camberra, ACT, Australia*, 2003.
- [178] Rolf Pfeifer. *Understanding intelligence*. The MIT Press, 2001.
- [179] Peter-Paul Pichler. *Natural Selection, Adaptive Evolution and Diversity in Computational Ecosystems*. PhD thesis, School of Computer Science, Faculty of Engineering and Information Sciences, University of Hertfordshire, 2009.
- [180] Marcin L Pilat, Takashi Ito, Reiji Suzuki, and Takaya Arita. Evolution of virtual creature foraging in a physical environment. In *Artificial Life 13*, volume 13, pages 423–430, 2012.
- [181] Marcin L Pilat and Christian Jacob. Creature academy : A system for virtual creature evolution. In *Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. *IEEE Congress on*, pages 3289–3297. IEEE, 2008.
- [182] Marcin L Pilat and Christian Jacob. Evolution of vision capabilities in embodied virtual creatures. In *Proceedings of the 12th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 95–102. ACM, 2010.
- [183] Jordan B Pollack, Hod Lipson, Gregory Hornby, and Pablo Funes. Three generations of automatically designed robots. *Artificial Life*, 7(3) :215–223, 2001.
- [184] Tom Quick, Kerstin Dautenhahn, Chrystopher L Nehaniv, and Graham Roberts. On bots and bacteria : Ontology independent embodiment. In *Advances in Artificial Life*, pages 339–343. Springer, 1999.
- [185] Robert B Raffa, Joseph R Iannuzzo, Diana R Levine, Kamal K Saeid, Rachel C Schwartz, Nicholas T Sucic, Oksana D Terleckyj, and Jeffrey M Young. Perspectives in pharmacology-bacterial communication (" quorum sensing") via ligands and receptors : A novel pharmacologic target for the design of antibiotic drugs. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 312(2) :417–423, 2005.

- [186] Steen Rasmussen. Towards a quantitative theory of the origin of life. *ALIFE*, pages 79–104, 1987.
- [187] Steen Rasmussen, Mark A Bedau, Liaohai Chen, David Deamer, David C Krakauer, Norman H Packard, and Peter F Stadler. *Protocells : bridging nonliving and living matter*. Mit Press Cambridge, 2009.
- [188] Steen Rasmussen, Liaohai Chen, David Deamer, David C Krakauer, Norman H Packard, Peter F Stadler, and Mark A Bedau. Transitions from nonliving to living matter. *Science*, 303(5660) :963–965, 2004.
- [189] Steen Rasmussen, Carsten Knudsen, and Rasmus Feldberg. Dynamics of programmable matter. *Artificial life II*, 10 :211–254, 1991.
- [190] Thomas S Ray. An approach to the synthesis of life. *Artificial Life II*, pages 371–408, 1991.
- [191] Thomas S Ray. Evolution and optimization of digital organisms. *H. B. Billingsley K. R., E. Derohanes (ed.), Scientific Excellence in Supercomputing : The IBM 1990 Contest Prize Papers*, pages 489–531, 1991.
- [192] Thomas S Ray. Is it alive or is it ga. 1991.
- [193] Thomas S Ray. *Population dynamics of digital organisms*. Media Magic, 1991.
- [194] Thomas S Ray. Foraging behaviour in tropical herbaceous climbers (araceae). *Journal of Ecology*, pages 189–203, 1992.
- [195] Thomas S Ray. An evolutionary approach to synthetic biology : Zen and the art of creating life. *Artificial Life*, 1(1_2) :179–209, 1993.
- [196] Thomas S Ray. Evolution, complexity, entropy and artificial reality. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 75(1) :239–263, 1994.
- [197] Thomas S Ray and Joseph Hart. Evolution of differentiated multi-threaded digital organisms. In *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS'99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 1–10. IEEE, 1999.
- [198] Thomas S Ray and Joseph Hart. Evolution of differentiated multi-threaded digital organisms. In , in *C. Adami, R. K. Belew, H. Kitano and C. E. Taylor (eds), Artificial Life VI proceedings, The MIT Press,*, volume VI, pages 295–304, Cambridge, 1999. IEEE.
- [199] TS Ray. Scientific excellence in supercomputing : The ibm 1990 contest prize papers, chapter evolution and optimization of digital organisms, 1991.
- [200] TS Ray Jr. Slow-motion world of plant'behavior'visible in rain forest [tropical vines]. *Smithsonian*, 9 :121–130, 1979.
- [201] W.A. Reiners. Complementary models for ecosystems. *The American Naturalist*, 127(1) :59–73, 1986.
- [202] Jean-Philippe Rennard. Golem numérique, vie et vie artificielle. 2008.
- [203] Craig W Reynolds. Competition, coevolution and the game of tag. In *Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pages 59–69, 1994.
- [204] Craig W Reynolds. Steering behaviors for autonomous characters. In *Game developers conference*, volume 1999, pages 763–782, 1999.

- [205] Mauno Rönkkö. An artificial ecosystem : Emergent dynamics and lifelike properties. *Artificial life*, 13(2) :159–187, 2007.
- [206] Steven T Rutherford and Bonnie L Bassler. Bacterial quorum sensing : its role in virulence and possibilities for its control. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 2(11) :a012427, 2012.
- [207] James S, Nilsson P, James G, Kjelleberg S, and Fagerström T. Luminescence control in the marine bacterium vibrio fischeri : An analysis of the dynamics of lux regulation. *J Mol Biol*, 296(1127–37), 2000.
- [208] Neale Samways, Yaochu Jin, Xin Yao, and Bernhard Sendhoff. Toward a gene regulatory network model for evolving chemotaxis behavior. *Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on*, pages 2569–2576, 2008.
- [209] S Setayeshgar, CW Gear, HG Othmer, and IG Kevrekidis. Application of coarse integration to bacterial chemotaxis. *Multiscale Modeling & Simulation*, 4(1) :307–327, 2005.
- [210] Daniel Shelley. *Frankenstein*. Gallimard, 1993.
- [211] Thomas S Shimizu, Sergej V Aksenov, and Dennis Bray. A spatially extended stochastic model of the bacterial chemotaxis signalling pathway. *Journal of molecular biology*, 329(2) :291–309, 2003.
- [212] Karl Sims. Evolving 3d morphology and behavior by competition. *Artificial life*, 1(4) :353–372, 1994.
- [213] Karl Sims. Evolving virtual creatures. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 15–22. ACM, 1994.
- [214] J Smith. Byte-sized evolution. *Nature*, 355(6363) :772–773, 1992.
- [215] Elliott Sober. 16*learning from functionalism : prospects for strong artificial life. *The Nature of Life*, page 225, 1992.
- [216] Victor Sourjik. Receptor clustering and signal processing in e. coli chemotaxis. *Trends in Microbiology*, 12(12) :569–576, 2014/09/15.
- [217] Victor Sourjik and Howard C Berg. Binding of the escherichia coli response regulator chey to its target measured in vivo by fluorescence resonance energy transfer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20) :12669–12674, 2002.
- [218] Peter A Spiro, John S Parkinson, and Hans G Othmer. A model of excitation and adaptation in bacterial chemotaxis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(14) :7263–7268, 1997.
- [219] Tom Standage. *The Turk : The Life and Times of the Famous 19th Century Chess-Playing Machine*. Walker, 2002.
- [220] Kenneth Stanley and Risto Miikkulainen. Evolving neural networks through augmenting topologies. *Evolutionary computation*, 10(2) :99–127, 2002.
- [221] RC Stewart, CB Russell, AF Roth, and FW Dahlquist. Interaction of cheb with chemotaxis signal transduction components in escherichia coli : modulation of the methylesterase activity and effects on cell swimming behavior. *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology*, 53 :27–40, 1988.

- [222] Richard C Stewart, Knut Jahreis, and John S Parkinson. Rapid phosphotransfer to chey from a chea protein lacking the chey-binding domain. *Biochemistry*, 39(43) :13157–13165, 2000.
- [223] Donald R Strong Jr and Thomas S Ray Jr. Host tree location behavior of a tropical vine (m on sters gi gont ea) by s kototropism. *Science*, 190 :804–806, 1975.
- [224] Hendrik Szurmant and George W Ordal. Diversity in chemotaxis mechanisms among the bacteria and archaea. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68(2) :301–319, 2004.
- [225] Walter Tackett and Jean-Luc Gaudiot. Adaptation of self-replicating digital organisms. 1993.
- [226] Ivan Tanev, Thomas Ray, and Andrzej Buller. Automated evolutionary design, robustness, and adaptation of sidewinding locomotion of a simulated snake-like robot. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(4) :632–645, 2005.
- [227] Arthur G Tansley. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16(3) :284–307, 1935.
- [228] Charles E Taylor, David R Jefferson, Scott R Turner, and Seth R Goldman. Ram : Artificial life for the exploration of complex biological systems. In *ALIFE*, pages 275–296, 1987.
- [229] Tim Taylor and Colm Massey. Recent developments in the evolution of morphologies and controllers for physically simulated creatures. *Artificial Life*, 7(1) :77–87, 2001.
- [230] Timothy J Taylor. From artificial evolution to artificial life. *PhD thesis*, 1999.
- [231] Demetri Terzopoulos, Xiaoyuan Tu, and Radek Grzeszczuk. Artificial fishes : Autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world. *Artificial Life*, 1(4) :327–351, 1994.
- [232] Kurt Thearling and Thomas S Ray. Evolving multi-cellular artificial life. In *Artificial Life IV*, pages 283–288, 1994.
- [233] Aaron Thierry, Owen L Petchey, Andrew P Beckerman, Philip H Warren, and Richard J Williams. The consequences of size dependent foraging for food web topology. *Oikos*, 120(4) :493–502, 2011.
- [234] Ahmed Tibermacine and Nouredine Djedi. Neat neural networks to control and simulate virtual creature’s locomotion. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference on*, pages 9–14. IEEE, 2014.
- [235] Peter M Todd. Artificial death. volume 2, pages 1048–1059, 1993.
- [236] Hirokazu Toju and Teiji Sota. Imbalance of predator and prey armament : geographic clines in phenotypic interface and natural selection. *The American Naturalist*, 167(1) :105–117, 2006.
- [237] Anne S Toker and Robert M Macnab. Distinct regions of bacterial flagellar switch protein flim interact with flig, flin and chey. *Journal of Molecular Biology*, 273(3) :623–634, 10 1997.
- [238] Xiaoyuan Tu and Demetri Terzopoulos. Artificial fishes : Physics, locomotion, perception, behavior. pages 43–50. ACM, 1994.
- [239] Alain. Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, B(237) :37–72, 1952.

- [240] Yoshiyuki Usami. Re-examination of swimming motion of virtually evolved creature based on fluid dynamics. In *Advances in Artificial Life*, pages 183–192. Springer, 2007.
- [241] P. H. G. van Langen, N. J. E. Wijnngaards, and F. M. T. Brazier. Towards designing creative artificial systems. *AIEDAM, Special Issue on Learning and Creativity in Design. A. H. B. Duffy and F. M. T. Brazier (editors).*, 18(4)(217–225), 2004.
- [242] Jeffrey Ventrella. Attractiveness vs efficiency. In *Artificial Life VI : Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life*, volume 6, page 178. MIT Press, 1998.
- [243] Jeffrey Ventrella. Explorations in the emergence of morphology and locomotion behavior in animated characters. In *Artificial Life IV*, pages 436–441, 1994.
- [244] Jeffrey Ventrella. "sexual swimmers". In *From Animals to Animats 4 : Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, volume 4, page 484. MIT Press, 1996.
- [245] Jeffrey Ventrella. Designing emergence in animated artificial life worlds. In *Virtual Worlds*, pages 143–155. Springer, 1998.
- [246] Jeffrey Ventrella. Genepool : Exploring the interaction between natural selection and sexual selection. In *Artificial Life Models in Software*, pages 81–96. Springer, 2005.
- [247] C Vlachos, RC Paton, JR Saunders, and QH Wu. A rule-based approach to the modelling of bacterial ecosystems. *Biosystems*, 84(1) :49–72, 2006.
- [248] Nikita Vladimirov, Linda Løvdo, Dirk Lebiedz, and Victor Sourjik. Dependence of bacterial chemotaxis on gradient shape and adaptation rate. *PLoS computational biology*, 4(12) :e1000242, 2008.
- [249] John Von Neumann and Arthur Walter Burks. Theory of self-reproducing automata. 1966.
- [250] George H. Wadhams and Judith P. Armitage. Making sense of it all : bacterial chemotaxis. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 5(12) :1024–1037, 12 2004.
- [251] Karina B Xavier and Bonnie L Bassler. Luxs quorum sensing : more than just a numbers game. *Current opinion in microbiology*, 6(2) :191–197, 2003.
- [252] Larry Yaeger. Poly world : Life in a new context. *Proc. Artificial Life*, 3 :263–263, 1994.
- [253] Larry Yaeger, Virgil Griffith, and Olaf Sporns. Passive and driven trends in the evolution of complexity. in *S. Bullock, J. Noble, R. Watson and M. A. Bedau (eds), Artificial Life XI : Proceedings of the Eleventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pages 725–732, 2008.
- [254] Larry S Yaeger and Olaf Sporns. Evolution of neural structure and complexity in a computational ecology. In *Artificial Life X : Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pages 330–336, 2006.
- [255] Lie Zi. *Traité du vide parfait*. Albin Michel, 1997.
- [256] Laura Zonia and Dennis Bray. Swimming patterns and dynamics of simulated escherichia coli bacteria. *Journal of The Royal Society Interface*, 6(40) :1035–1046, 2009.