

Université Denis Diderot Paris VII



# **Robotique évolutionnaire et biologie de l'évolution. Quels liens épistémiques?**

simon

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master LOPHISS

Sous la direction scientifique de M. Nicolas Bredèche  
Sous la responsabilité pédagogique de Mme Joëlle Provasi

Rapporteurs : Philippe Huneman, Michel Morange

Année académique 2011-2012

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
1.1	Algorithmique Évolutionnaire et Synthèse Moderne . . . . .	2
1.2	La Robotique Évolutionnaire . . . . .	4
<b>2</b>	<b>La Robotique Évolutionnaire, un modèle pour mieux comprendre l'évolution</b>	<b>6</b>
2.1	Comprendre l'évolution . . . . .	6
2.1.1	Analogie sélection artificielle - SN . . . . .	6
2.1.2	Les expériences de pensée . . . . .	7
2.1.3	Les modèles et simulations informatiques . . . . .	7
2.2	Une nouvelle méthode, la Robotique Évolutionnaire ? . . . . .	9
2.2.1	Qu'est-ce que la Robotique Évolutionnaire ? . . . . .	9
2.2.2	Qu'apporte-t-elle de nouveau ? . . . . .	11
<b>3</b>	<b>La biologie de l'évolution, une source d'inspiration pour la robotique évolutionnaire</b>	<b>12</b>
3.1	l'individu en Robotique Évolutionnaire . . . . .	12
3.2	L'individu en Biologie . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>15</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Algorithmique Évolutionnaire et Synthèse Moderne

Depuis maintenant une quarantaine d'années, l'informatique assiste à l'expansion et la popularisation de toute une famille de techniques et méthodes désignées par le terme d'Algorithmique Évolutionnaire (ou Informatique Évolutionnaire, en anglais *Evolutionary Computation*, *EC*, cf. Eiben and Smith (2003)).<sup>1</sup> Sous cette étiquette sont regroupées des méthodes apparues plus ou moins parallèlement dans les années 60-70, comme les Algorithmiques Génétiques (Holland, 1975) ou les Stratégies Évolutionnaire (Rechenberg, 1973).

Le point commun de ces techniques est que toutes reprennent l'idée proposée par Darwin (1859) de l'évolution par sélection naturelle. L'intuition est la suivante : si la force adaptative de l'évolution telle que l'a décrite Darwin a permis l'émergence d'espèces et d'organes extrêmement adaptés aux contraintes et conditions environnementales, allant du bec du pivert parfait pour percer les arbres et attraper les insectes à la graine couverte d'un duvet que la moindre brise transporte,<sup>2</sup> alors pourquoi ne pas utiliser cette force pour programmer des outils et calculer des solutions à des problèmes aussi différent que de trouver le plus court chemin pour visiter de nombreuses villes (le fameux problème du voyageur de commerce) où l'agencement optimal de composant électronique sur une puce ?

Cette intuition Turing (1950) l'avait dès 1950, dans son article que beaucoup considèrent comme fondateur de l'intelligence artificielle moderne "Computing Machinery and Intelligence". Dans cette tentative de concevoir une machine intelligente, il propose de ne pas s'attaquer de front au "développement d'un programme pour simuler l'esprit humain, mais [...] plutôt d'essayer de produire l'esprit d'un enfant" (Turing, 1950, p. 456). Et c'est pour trouver la bonne "machine enfant", qui devrait d'après lui être plus simple à programmer, qu'il imagine un processus d'essais/erreurs qu'il identifie à l'évolution. Cette évolution, ajoute-t-il, "l'expérimentateur, par l'exercice de son intelligence, serait capable de l'accélérer". Il la résume ainsi :

---

1. Evolutionary Computation = Informatique Evolutionniste ? mais Informatique en France != de computation donc algorithmique computationnelle ? Aussi Évolution artificielle envisageable ? comment choisir ? Nous utiliserons de façon équivalente : Algorithmique Évolutionnaire, Informatique évolutionnaire, pour désigner les techniques décrites en anglais sous le terme d'Evolutionary Computation, Artificial Evolution ou encore d'Evolutionary Algorithms

2. Pour reprendre certains des exemples de Darwin (1859, ch. 3).

Structure of the child machine	=	Hereditary material
Changes " " "	=	Mutations
Natural selection	=	Judgment of the experimenter

(Turing, 1950, p. 456)

Ces propriétés et les divers avantages que Turing dégage de sa technique seront les mêmes que reprendrons et qui constitueront les bases des techniques d'EC développées quelques vingt ans plus tard.

Il est intéressant aussi de noter comment ce schéma simple de l'évolution, qu'esquisse rapidement l'un des pères de l'informatique, illustre bien comment la théorie de l'évolution peut être, et a été, sujette à ce genre d'entreprise "d'axiomatisation". Ainsi nombre de biologistes à la suite de Darwin ont réfléchi à une "recette idéale" de l'évolution et ont essayé de trouver un ensemble de propriétés suffisantes et/ou nécessaires qui permettraient aux êtres vivants (voir pour certains à n'importe quels "systèmes", vivants ou non) d'évoluer<sup>3</sup>. Ces recettes, minimalistes, sont parfaites pour être transcrites en algorithmes. Il semble naturel que les informaticiens, adeptes de l'automatisation, aient eu envie de les reprendre à leur compte pour ne plus avoir à construire eux mêmes les solutions à chaque problème qui leur était soumis, mais pour mettre au point un "solveur universel" (*universal solver*) capable de trouver les solutions à tout –ou au moins une large gamme– de problèmes possibles.

L'époque se prêtait d'autant plus à l'émergence de telles méthodes que la synthèse moderne était finie et avait eu le temps d'être adoptée par la communauté scientifique (ce qui n'était peut-être pas encore tout à fait le cas lorsque Turing écrivait son article). Cette synthèse moderne, appelée aussi Théorie Synthétique de l'Évolution d'après le titre d'un livre d'un des ses architectes, c'est déroulée (selon les versions les plus répandues) entre les années 1937 et 1950 (Reif et al., 2000)<sup>4</sup>. Non seulement elle a vu se réconcilier les lois de transmission mendélienne des caractères génétiques (discrets) avec l'évolution (graduelle) des êtres vivants selon Darwin, mais elle a aussi affinée et agrémentée la théorie de tout un arsenal d'outils mathématiques et de modèles statistiques et conceptuels. Là où il n'y avait que des concepts, des idées, venaient désormais se greffer des équations, des chiffres et des tables statistiques, bien plus précise et simples à implémenter avec un ordinateur que des intuitions abstraites. Les équations de Fisher (1930) pouvaient être reprises telles qu'elles, les paysages adaptatifs de Wright offraient l'outil parfait pour illustrer les espaces de recherche des solutions avec lesquelles jonglent les ordinateurs<sup>5</sup>. Le lien entre cette synthèse moderne arrivée à maturité et l'émergence de l'algorithmique évolutionnaire dans les années 70 est donc étroit. Néanmoins et comme nous le verrons plus en détails dans la seconde partie de ce mémoire, il ne faudrait pas que ces liens marque trop profondément le domaine, et si il a été un guide et un soutien solide il ne doit pas devenir un entrave. Toujours est-il qu'au début des années 70 un ensemble de techniques innovantes et efficaces voyaient le jour, qui en reprenant certains concepts clefs de la théorie de l'évolution, pouvaient résoudre des problèmes là où les méthodes traditionnelles souvent n'y arrivaient pas ou moins rapidement. Ces techniques, clairement inspirées par la théorie de l'évolution et sa synthèse moderne des années 50, calquent le vocabu-

3. Godfrey-Smith (2009, p. 19-38) dans sa critique de ces “recettes”, passe en revue les plus connues d’entre elles

4. Mayr ? Justifier un flou et prendre plus large 30-60 pour inclure Fisher ?

5. ces paysages adaptatif, plus souvent appelé “fitness landscape” en sciences computationnelle sont si pertinents conceptuellement qu’ils sont devenus un élément incontournable du vocabulaire du domaine, et qu’on les retrouve toujours dès l’introduction d’un des “textbook” de la discipline (Eiben and Smith, 2003, p. 12)

laire de la biologie à des problèmes divers (c'est une de leurs force). Mais bien que très efficace, ce lien établit entre problèmes informatiques termes biologiques est avant tout très conceptuel et abstrait. L'exemple classique en informatique théorique qu'est le problème du voyageur de commerce illustre à merveille le genre de problème que peux aider à résoudre ces techniques, et la nature du transferts des connaissances entre biologie et informatique.

Dans ce problème bien connus des mathématiciens et informaticiens, un voyageur doit passer par un ensemble de villes en traversant chaque ville une seule fois. Le but pour lui est évidemment de parcourir le moins de kilomètres possibles est d'optimiser au mieux l'ensemble de ses trajets. Comme souvent en informatique la meilleure et plus sûre façon de trouver la solution à ce problème et de tester tous les trajets possible pour trouver le plus court. Le problème dans ce cas est que le nombre de trajets possibles peut être vite, très, très important. Ajouter une ville par laquelle notre voyageur doit passer ce n'est pas ajouter un nouveaux trajet possible mais,  $M \times N$  trajets (où  $M$  et  $N$  sont respectivement le nombre de solutions et le nombre de villes du problème avant l'ajout de la nouvelle ville). Autrement dit si vous aviez 6 villes à parcourir, en ajouter une seule à votre traverser et vous obtenez 4320 nouveaux trajets à tester. Le problème est dit NP-complet.

Et là les algorithmes génétiques viennent à la rescousse. Comment ? je veux trouver le plus court trajet = c'est ma solution. Dans la nature la solution est le gène bien adapté à son environnement. Je me débrouille pour encoder ma solution sous une forme manipule numérique (dans le cas présent la suite des villes suffira : une chaîne) et très vite l'algorithme trouvera une très bonne solution. Qui ne sera peut-être pas la meilleure solution mais qui sera très proche de cette dernière.

## 1.2 La Robotique Évolutionnaire

Il a ensuite à nouveau fallu attendre une vingtaine d'années que l'informatique évolutionnaire fasse ses preuves et qu'en parallèle la robotique évolue, pour qu'apparaisse dans les années 90 ce qui *a posteriori* apparaît comme probablement plus proche des "intuitions" de Turing : la Robotique Évolutionnaire. Il n'est plus question ici de trouver des solutions à des problèmes en utilisant des représentations pour lesquels l'analogie avec la biologie est lointaine et se borne souvent à des emprunts de vocabulaire. Avec la robotique la donne change. Pour les roboticiens le but est de construire des robots qui seront amenés à se déplacer dans un environnement "réel", ouvert et changeant. Les contraintes qui s'appliqueront sur les systèmes à concevoir sont *a priori* les mêmes que celles auxquelles sont soumis les êtres vivants. Et les tâches que ces "agents" doivent effectuer ressemblent de plus en plus au comportement des êtres vivants observables dans la nature. Le chercheur en robotique veut un robot capable de se déplacer dans son environnement en évitant les obstacles, de modifier, d'échanger avec cet environnement pour assurer son autonomie énergétique, ou encore de se synchroniser avec d'autres "agents" pour construire des structures complexes. L'analogie est cette fois-ci beaucoup plus forte les individus biologiques et les robots partagent un environnement physique commun et souvent, leur "survie" (dans le sens du maintien de leur activité) repose sur les mêmes nécessités.

Introduction du plan est des problématiques à revoir totalement.

La proximité des problématiques ouvre la porte sur une nouvelle piste de réflexion à laquelle l'EC laissait moins la place. Pourquoi ne pas utiliser l'ER comme modèle de

la biologie pour tester les théories de l'évolution ? Cette question beaucoup de chercheurs en ER se la posent Mais si l'analogie est si forte, ne pouvons nous pas pousser celle-ci plus en avant encore et prendre la Robotique Évolutionnaire comme modèle de la théorie de l'évolution et les simulations faite dans ce domaine ne peuvent-elle pas servir de base pour mieux comprendre l'évolution des êtres vivants ? Le biologiste a-t-il intérêt à se tourner vers ces méthode pour avancer dans la compréhension des phénomènes évolutifs ? Et effet, C'est en effet ce que beaucoup de chercheur dans le domaine ont pensés, et nombreux voit la robotique évolutinonaire comme un outils de recherche. Dans cette optique elle se rapproche et se mélange à ce que l'ont appelle la Vie Artificielle, profitant d'un statut hybride. C'est pourquoi, après avoir rappelé les principes généraux de la robotique évolutionnaire en illustrant ces réussites par quelques exemples, nous essayerons de dégager le statuts et la place de la robotique évolutionnaire au seins des différetns éléments épistémique déjà connus tels que les modèles mathématique, les simulations informatiques, les expériences empiriques comme l sélection artificielle ou les expériences de pensée en montrant la place privilégié qu'occupe la Robotique évolutionnaire.

Une fois que nous aurons démontré le rôle épistémique de cette robotique évolutionnaire nous essayerons de montrer qu'elle ne doit pas s;'en satisfaire, et que si elle peut offrir des pistes d'études pour les biologistes, elle ne doit pas oublier de s'enrichir des pistes déjà ouvertes et explorées p[ar les biologistese et surtoout les philosophes de la biologies. Nous essayerons de montrer en mettant côte à côte la notion d'individu tel qu'elle est utilisée actuellement en RE et les reflexions menées par les biologistes, que les pistes lancées par les philosophes pour être de vraies solution pour résoudre les problèmes que pourrait rencontrer la robotique evolutionnaire.

## Chapitre 2

# La Robotique Évolutionnaire, un modèle pour mieux comprendre l'évolution

Dans ce chapitre nous allons dans un premier temps essayer d'analyser certains outils scientifique utilisé pour comprendre l'évolution. Pour chacun de ces outils nous en dégagerons les points fort et les points faible. Nous définirons ensuite plus en détails ce qu'est la Robotique évolutionnaire pour la positionner parmi ces différents outils dans le but d'en mettre en avant les atouts qui rendent son utilisation pertinente dans une tentative de comprendre l'évolution.

Avant de parler plus en détails de la robotique évolutionnaire et d'expliquer son intérêt pour comprendre l'évolution des êtres vivants, nous allons d'abord essayer de voir quelles moyens et quelles approches sont possible pour (expliquer) l'évolution. (Mettre de côté l'explication historique en se positionnant pour mais sans intérêt dans notre cas)

Nous analyserons ensuite, après avoir vu plus en détails le fonctionnement de la robotique évolutionnaire, quelle est sa place vis à vis des méthodes énoncées et en quoi elle nous semble pertinente comme outils pour explorer l'évolution.

*problème de la position illustration/explication*

### 2.1 Comprendre l'évolution

Ainsi donc depuis Darwin de nombreux outils ont été utilisé pour essayer de mieux comprendre certains des mécanismes évolutifs en jeu.

Mais ces méthodes sont nombreuses et différents selon les objectifs de ceux qui les manient. La ligne directrice de se travail tachera d'essayer d'éviter d'expliquer l'évolution. Les méthodes décrites ici ne se prétendent pas exhaustives du tout GROS !

#### 2.1.1 Analogie sélection artificielle - SN

Un intérêt certain a utilisé la sélection artificielle sur des êtres vivants. Darwin (1859) : premier chapitre Waters (1986) l'analogie Evans (1984)

Des exemples récents : Lenski and Travisano (1994); Elena and Lenski (2003); Pinheiro and Holliger (2012); Pinheiro et al. (2012)

Néanmoins problèmes : lenteurs du processus, difficultés du choix des paramètres à tester (liberté limitée), etc. En réponse, :

### 2.1.2 Les expériences de pensée

Permet de s'extraire des problèmes de SA. Dennett (1995) Sterelny and Griffiths (1999)(exemple des 2 criquets ? De qui est-ce à l'origine ?) Mais au prix de nombreux sacrifices (Wilson, 1999, ch. I)

### 2.1.3 Les modèles et simulations informatiques

Avant de voir comment appliquer les modèles simulations informatiques à la biologie, intérêt épistémique de ces derniers ?

#### Des "outils"(artefact) épistémiques généraux

Les modèles informatiques sont finalement proches des expériences classiques. L'idée d'Hacking "have a life of their own" se transpose aussi plutôt bien Winsberg (2009) Knuuttila and Voutilainen (2002) Humphrey,...

#### En biologie : Opaque thought experiment

Les modèles computationnelles et surtout les simulations informatiques ont depuis longtemps (Langton 1987 ?) été utilisés pour essayer de comprendre la biologie. Ce domaine, vaste, flou, à la croisée de nombreux autres, est souvent désignée par le nom vie artificielle (*artificial life* en anglais, ou *alife*, cf Langton (1989)). Nous verrons que par bien des aspects, historiques, méthodologiques et scientifiques, cette communauté a toujours été très proche de la robotique évolutionnaire. L'un des buts de cette discipline est donc de "faire" de la vie, en utilisant des techniques et procédés mis au point par l'homme et donc, artificiels.

Barandiaran and Moreno (2006) divisent en trois catégories les modèles produits et étudiés par/dans cette discipline :

1. Les modèles esthétiques,
2. les modèles d'ingénierie et,
3. les modèles épistémiques.

Ce sont avec ces modèles épistémiques que nous voulons ici rapprocher la robotique évolutionnaire. L'intérêt n'est plus de construire un objet technologique avec des caractéristiques particulières<sup>1</sup>, mais de comprendre "comment les systèmes naturels fonctionnent".

Parmi les modèles épistémiques, Barandiaran and Moreno (2006) dégagent 4 classes bâties en fonction du but et de la portée épistémique du modèle :

(a) Des modèles génériques,

---

1. Ce qui correspond évidemment aux caractéristiques de la catégorie 2 de Barandiaran et Moreno dans laquelle pourrait aussi être classée la robotique évolutionnaire. Mais ce classement n'est pas forcé *a priori* : la robotique évolutionnaire pourrait n'être qu'un outil d'ingénierie n'ayant à voir avec la vie artificielle mais que le mot *évolutionnaire* et donc ne pas être classé comme modèle d'ingénierie de vie artificielle mais comme technique d'ingénierie tout court.



- (b) des modèles conceptuels,
- (c) des modèles fonctionnels et,
- (d) des modèles mécanistes.

Les deux dernières classes décrivent des modèles qui s'évertuent à recréer des mécanismes présents dans le vivant pour en permettre l'étude (par exemple reconstruire une fourmilière artificiellement) et se veulent (surtout pour les modèles mécanistes) au plus proche possible des données empiriques. Leur but est de valider des modèles précis de fonctions et mécanismes du vivant (modèles d'une synapse, etc.).

Les deux premières classes elles se veulent plus générales. Les modèles qui tombent dans la première se rapprochent plus des lois mathématiques (les auteurs donnent l'exemple des modèles NK de Kauffman, etc.) très génériques et applicables aussi bien aux réseaux sociaux qu'aux interactions protéiques. Les seconds, les modèles conceptuels, ont quant à eux un statut épistémique plus "hétérodoxe". À cheval entre théorie et expérience empirique, ils servent d'outils pour questionner et réorganiser certaines assumptions théoriques. Ce sont dans cela que nous voulons classer la robotique évolutionnaire.

L'idée de ces modèles conceptuels est de permettre la mise sur pieds de simulations comme véritables "expériences de pensée", beaucoup plus élaborées que celles que le cerveau humain seul peut faire. Ces expériences de pensée peuvent être d'une grande utilité. Nous rejoignons en ce sens les conclusions de Paolo et al. (2000) et sans prétendre qu'elles offriraient l'accès à des connaissances qui sans elles seraient inatteignables, il nous semble claire qu'elles peuvent "[to help] changing an attitude toward an already known piece of information.", et qu'elles permettent la remise en question et la mise à l'épreuve de certains points théoriques flous ou mal compris.

Notre but ici n'est pas d'avancer, comme le fait Bedau (1998) et les partisans d'une vie artificielle forte (*strong Alife*), que les phénomènes observés *sont* biologiques. Non plus que de dire que seule la reconstitution de ces phénomènes via une approche artificielle, la reconstruction d'une biologie tel qu'elle *pourrait* être, d'une *biologie universelle*, permettrait de comprendre les mécanismes de la biologie tel que nous la connaissons. Cette approche d'une vie artificielle *forte*, qui veut que les propriétés des parties étudiées suffisent à faire *émerger* la vie, indépendamment du substrat physique, serait difficile à tenir ici, d'autant qu'elle a beaucoup été critiquée par certains philosophes de la biologie (Sterelny and Griffiths, 1999, Ch. 15). Néanmoins même les plus critiques semblent s'accorder sur la valeur, si ce n'est explicative des modèles artificiels, au moins illustrative de ceux-ci. Et c'est cette valeur illustrative, cette capacité défendue par Paolo et al. (2000) qu'ont les modèles artificiels à permettre de dérouler des mécanismes aux interactions multiples et qui rendent les systèmes difficiles à analyser analytiquement au premier abord, et que leurs équivalents artificiels ouvrent à l'expérimentation. On peut alors en tester certains paramètres, les ajuster, jusqu'à éclaircir une situation *a priori* bien "opaque".

Pour ce qui est des modèles de vie artificielles appliqué à l'évolution Huneman (2012) a déjà montré que l'algorithmique évolutionnaire peut être utile à certains degrés. En insistant sur certaines précautions à prendre : en biologie tout interagit avec tout (cf Eldredge), on "choisi" avec les modèles en mettant donc certaines choses de côté.

Nous allons voir ce qu'il en est lorsque les algorithmes génétiques sortent du carré de l'unité centrale de l'ordinateur et se garnissent de capteur et d'effecteurs, pour devenir à leur tour agent "incarnés". Dans ce qu'il est convenu d'appeler la Robotique évolutionnaire

## 2.2 Une nouvelle méthode, la Robotique Évolutionnaire ?

Mais avant de souligner les particularités épistémiques de la Robotique Évolutionnaire, nous allons d'abord revenir un peu sur son histoire et sur ces différents aboutissements.

### 2.2.1 Qu'est-ce que la Robotique Évolutionnaire ?

#### Bref Historique

Comme nous l'avons déjà décrit en introduction, la Robotique Évolutionnaire (en anglais *Evolutionary Robotics*) a vu le jour dans la foulée du développement de l'algorithme évolutionnaire quelques dizaines d'années après que celle-ci fut développée. Mais comme nous l'avons aussi déjà souligné l'idée de faire évoluer des machines complètes, complexes, dans l'environnement réel, est probablement plus vieille, au moins autant que l'apparition de l'algorithme évolutionnaire. Turing déjà semblait avoir en tête des robots plutôt que des solutions. En réalité si la Robotique Évolutionnaire a mis tant de temps à voir le jour, il semble assez clair que les "machines" qu'il souhaitait évoluer sont plus des robots que des solutions. Bien que l'idée d'appliquer ces algorithmes évolutionnaires sur des robots était présente dès le début des techniques d'informatique évolutionnaire, la mise en pratique de ces dernières ne s'est faite que dans les années 1990. Cette apparition relativement tardive par rapport à la naissance de l'EC a eu lieu de façon quasi simultanée et parallèle dans au moins deux universités d'Europe et des États-Unis (voir par exemple Harvey et al. (1997)). Elle a en réalité, en grande partie été rendue possible par le développement quelques années auparavant de ce que l'on appelle *la robotique réactive* (Brooks, 1991).

Ce nouveau courant de robotique a opéré un changement conceptuel quasi philosophique à la fin des années 80 en démontrant brillamment que la voie suivie par l'Intelligence Artificielle traditionnelle, fille du computationalisme des années 60, n'était pas la seule possible. Reprenant les travaux de Braintenberg (1986) et de certains éthologues, Brooks montra que pour obtenir des comportements efficaces et robustes dans des environnements complexes, la longue computation d'une représentation symbolique du monde n'est pas forcément la meilleure solution pour agir avec justesse et rapidité. Souvent il suffit de construire un système dont les propriétés morpho-physiologiques répondent correctement aux contraintes de l'environnement, s'inscrivant dans une boucle "perception-action" simple et "réactive".

Ce changement de perspective a permis aux chercheurs en évolution artificielle d'imaginer pouvoir coder simplement des comportements efficaces et intéressants, sans besoin de bases de données gigantesques manipulées par des systèmes experts complexes. Cette approche, couplée avec les neurones artificiels notamment, dont le succès ne cessait (et n'a toujours pas cessé) de croître, se présentait comme la candidate idéale pour penser et concevoir une robotique évolutionnaire efficace.

Le succès du transfert des techniques d'algorithme évolutionnaire fut assez rapide et concluant. Il devenait possible de concevoir des robots sans avoir à connaître les réglages délicats nécessaires au bon fonctionnement des machines, ces réglages étant *adaptés* quasi optimalement par l'évolution. Ainsi en 2000 paraissait le livre "éponyme" *Evolutionary Robotics* (Nolfi and Floreano, 2000), signe selon certains, de l'auto reconnaissance de la Robotique Évolutionnaire en tant que discipline à part entière. On ne citera pas toutes les réussites de cette discipline, mais celles-ci sont

nombreuses, allant de l'évolution de robots capable de se recharger en se dirigeant grâce à des indices lumineux à l'évolution de groupes de robots capables de coopérer pour résoudre des problèmes de rangements d'objet.

### Exemple et aboutissement

Cette réussite (relative, comme nous le verrons ensuite) pourrait bien s'expliquer par l'analogie forte qu'il y a entre la robotique et le monde du vivant. En effet des "individus", des agents, vont se déplacer dans l'environnement et interagir avec lui. Que ce soit en biologie ou en robotique ; les fonctions développées par les uns, voulus pour les autres, sont les mêmes : autonomie énergétique, comportementale, adaptation aux variations du milieu, coopération, coordination, etc. Quoi de plus naturel donc que de vouloir, pour construire ces robots, utiliser la recette toute prête et bien définie par les biologistes, de l'évolution par sélection naturelle ? Si l'on reprend par exemple la définition parmi les plus citées, de Lewontin (1970) :

1. Different individuals in a population have different morphologies, physiologies, and behaviors (phenotypic variation).
2. Different phenotypes have different rates of survival and reproduction in different environments (differential fitness).
3. There is a correlation between parents and offspring in the contribution of each to future generations (fitness is heritable).

On comprend assez aisément que reprendre cette "formule magique" a été un jeu d'enfant pour les informaticiens des années 70. Ils n'avaient qu'à suivre point par point cette recette pour construire un système qui répondrait à ses attentes et qui "devrait" donc, en théorie, évoluer en s'adaptant par sélection naturelle.

Voici comment Holland (1975) et ses associés ont construit leurs algorithmes (les algorithmes génétiques) pour qu'ils suivent la définition : Des individus sont définis, dont les caractéristiques varient aléatoirement (1). La qualité (la *fitness*) de ces individus peut être mesurée au regard du problème à résoudre, certaines variations répondant mieux au problème que d'autres (la fitness des individus est différente) (2). Enfin, les caractéristiques des individus les mieux adaptés (qui répondent mieux au problème) sont transmises plus ou moins fidèlement et avec une plus grande probabilité que celles des individus moins bien adaptés, à de nouveaux individus formant une nouvelle génération (3) (cf. fig. 2.1 pour une implémentation plus précise).

Si il est tout à fait logique que les algorithmes génétiques répondent parfaitement à la définition de l'évolution par sélection naturelle puisque ils ont été créés pour le faire, il est néanmoins intéressant de remarquer à quel point les roboticiens n'ont pas eu trop à les distordre pour s'en servir. En effet, là où les informaticiens en algorithmique évolutionnaire classique ont souvent dû ruser, détourner et ajouter de nombreux mécanismes *ad-hoc* et sans équivalent biologique aux principes de base pour répondre aux problèmes qui leur étaient posés, les roboticiens n'ont bien souvent eux qu'à reprendre les premières formulations des algorithmes génétiques (cf. fig. 2.1), superposables quasi parfaitement avec la définition de Lewontin, pour obtenir de très bons résultats (pour une revue assez complète, voir Nolfi and Floreano (2000), pour une revue plus récente : Floreano and Keller (2010)).

Tout comme en Informatique Évolutionnaire les nuances et les "écoles" sont nombreuses. Il existe de nombreuses "approches" possibles.

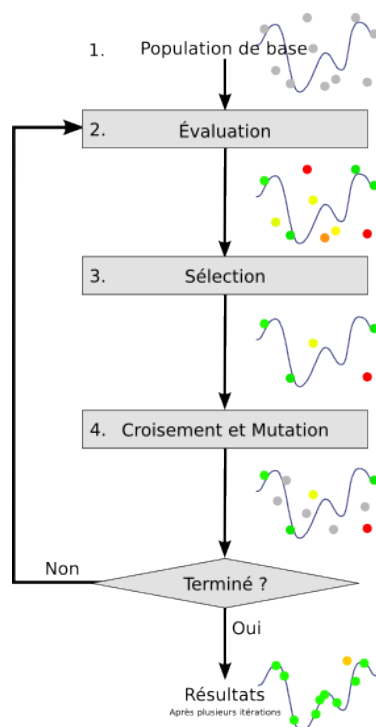


FIGURE 2.1 – Exemple d’algorithme génétique (source : wikipedia)

### 2.2.2 Qu’apporte-t-elle de nouveau ?

La RE tiens un peu de chaque élément de la section 2.1 C’est une simulation informatiques plus proche de l’expérience classique, car elle partage plus de similarité avec l’objet d’étude (l’évolution des êtres vivant : *embodiment*, boucle perceptions/action dans le monde physique) que les simulations sur ordinateur, tout en conservant une liberté plus grand que les expériences sur les êtres vivant et permettre de rejouer mille fois la cassette d’une vie factice. Il est possible, comme dans une expériences de sélection artificielle, d’observer physiquement l’évolution des comportement tout en gardant la possibilité d’accélérer.

## Chapitre 3

# La biologie de l'évolution, une source d'inspiration pour la robotique évolutionnaire

### 3.1 l'individu en Robotique Évolutionnaire

### 3.2 L'individu en Biologie

—— quelques lignes à récupérer Mais en gros ici il faut illustrer avec des exemples

——

C'est dans cette optique que nous voyons l'apport épistémique de la robotique évolutionnaire à la biologie, des modèles conceptuels permettant d'éclaircir les théories.

Et cette démarche a déjà largement été embrassée par les acteurs de la discipline. On notera par exemple l'étude de Nolfi and Parisi (1996) qui mesurent la différence d'efficacité entre un cas où les caractères adaptés sont uniquement adaptés par évolution, et un autre où une phase d'apprentissage est associée à l'évolution dans une tentative toute théorique de montrer que "learning and behavior are among the causes of evolution". On notera aussi les travaux de Waibel et al. (2006) sur l'impact de la distance génétique entre les individus sur la division des tâches au sein d'une colonie, ou encore de Waibel et al. (2009) qui essayent d'étudier l'impacte du niveau de sélection dans une population sur l'évolution de certains caractères. Autant d'essais pour illustrer les effets de propositions initialement faites par les théoriciens de la biologie, toujours débattues par ses derniers quant au rôle qu'elles ont pu jouer dans l'émergence des formes de vies actuelles. Si la robotique évolutionnaire ne pourra trancher elle-même sur ces questions et dire effectivement quel a été l'impact de la "kin selection" dans l'évolution de la vie actuelle, toujours est-il qu'elle peut donner d'importants indices sur la prise en compte et l'importance de ces hypothèses au sein de théories plus larges.

Mais l'échange épistémique de doit pas s'arrêter là, bien au contraire. Cette volonté des chercheurs en robotique évolutionnaire de se tourner vers des questions de biologie théorique, témoigne parfois de la volonté de ces derniers de trouver des solutions à des problèmes qui les empêchent d'avancer. En effet, si l'on retourne sur les résultats

“d’ingénierie” apportés par la robotique évolutionnaire, ceux-ci restent limités. C’est en cela que la réussite n’est pas totale (et peut-être heureusement d’ailleurs).

Appliquant à la lettre les principes de l’évolution par sélection naturelle tel que nous les avons décrits, les chercheurs en RE se sont vite retrouvés bloqués par de nombreux problèmes pratiques. Et si la fine adaptation de fonctions particulières et clairement définies et mesurables se fait très efficacement par ces méthode, développer un ensemble de fonctions complexes et *a priori* inconnues devient impossible. Il serait même tentant d’y voir une belle illustration de la critique de Gould and Lewontin (1979).

En effet, calqués sur le modèle traditionnel adaptationniste, les roboticiens doivent créer des systèmes capables d’adapter graduellement les robots jusqu’au but ultime attendu. Malheureusement cette gradualité ne peut s’obtenir qu’au prix d’une connaissance quasi complète du problème, afin de pouvoir évaluer parfaitement quels sont les robots mieux adaptés que d’autre et pouvoir sélectionner chaque fois les mutations qui nous conduirons sans détours sur la route de la meilleure solution. Hors c’est tout le contraire que voulait le projet initial de la robotique évolutionnaire : ne pas avoir à connaître les détails du problème pour le résoudre. Ici les roboticiens doivent reconstruire de leurs mains les “histoires adaptationnistes” tant critiquées par Gould. Donnant crédit à ce dernier, cette voie est de moins en moins suivie par les chercheurs en robotique évolutionnaire. Construire ces histoires et souvent trop complexe, voir impossible. Sélectionner untel plutôt qu’un autre n’a vite plus de sens lorsqu’il s’agit de répondre à des problème plus généraux et complexes. Les individus deviennent vite, aux yeux de l’expérimentateur, souvent “aussi bons” ou plutôt “également mauvais” et indépartageable d’un point de vue purement adaptatif.

Ainsi, dans l’optique de surmonter ces obstacles, de nombreux efforts ont été entrepris depuis une dizaine d’années par les informaticiens pour re-intégrer au sein de l’algorithmique évolutionnaire les avancées récentes de la biologie (Hu and Banzhaf, 2010). Le fort désir d’intégrer l’évo-dévo dans une “evo-devo-robo” est symptomatique de ces démarches et abondamment discuté (Bredeche et al., 2011). Parfois des solutions sont cherchées en ajoutant des concepts absents ou difficilement transposable à la biologie, comme l’ajout d’une pression sélective à la diversité (Mouret and Doncieux, 2012).

Ce semi échec et ce désir fort de trouver de nouvelles solutions ne doivent pas être négligés. Compte tenu de la position épistémique que nous avons choisie d’adopter, ils pourraient très bien être l’indice d’un semi-échec de la théorie de l’évolution elle-même et justifient bien un retour sur la théorie biologique.

À titre d’exemple il pourrait être très intéressant de reprendre le cadre de réflexion offert par Godfrey-Smith (2009) pour classer les différentes populations darwiniennes et voir ou pourrait se situer la robotique évolutionnaire. L’utilisation dès la base, d’une certaine approche de la théorie de l’évolution, par sélection naturelle, d’individu (défini en générale par leur gènes et capable de reproduction sexué, se reproduisant en génération avec une transmission de parent à enfant seulement) pourrait très bien être un frein important au développement de l’évolution artificielle. Godfrey-smith ne nous dit-il pas lui-même que les populations biologique ne sont pas toute darwinienne au même degré ? Alors que les informaticiens on voulu calquer un certains type de population darwinienne “paradigmatique” dans leur modèle, ne se sont-ils pas limités ?

Ainsi, revoir tous les concepts et notions utilisés à la lumière d’une philosophie de la biologie plus récente, ouverte nous semble la marche à suivre. Que sont vraiment les individus que la robotique évolutionnaire cherche à faire évoluer ? quels notions

de fitness peuvent leur convenir ? Que faire de l'épigénétique, de la "niche construction" ? Des pistes de réflexions sur ces questions sont données par de nombreux philosophes, et l'application du fruit de ces réflexions à la robotique pourrai non seulement résoudre certains problème, mais aussi en retour servir d'illustration, et appuyer plus ou moins, certaines visions et certaines voies théoriques à prendre pour la biologie de l'évolution.

C'est dans cet échange à double sens non symétrique, supervisé avec attention par le philosophe de la biologie, que nous voyons les perspectives les plus fructueuses pour la robotique évolutionnaire *et* (quoique probablement dans des mesures différentes, d'où le *non-symétrique*) pour la biologie de l'évolution.

## **Chapitre 4**

## **Conclusion**



# Bibliographie

- Barandiaran, X. E. and Moreno, A. (2006). ALife Models as Epistemic Artefacts. In Rocha, L. M., Yeager, L. S., Bedau, M. A., Floreano, D., Goldstone, R. L., and Vespignani, A., editors, *Artificial Life X : Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pages 513–519. International Society for Artificial Life, The MIT Press (Bradford Books).
- Bedau, M. (1998). Philosophical Content and Method of Artificial Life. In Bynum, T. W. and Moor, J. H., editors, *The Digital Phoenix : How Computers are Changing Philosophy*, pages 135–152. Basil Blackwell, Oxford.
- Braitenberg, V. (1986). *Vehicles : Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press.
- Bredeche, N., Montanier, J.-M., and Carrignon, S. (2011). Evolutionary adaptation of a population of robots : benefits and issues of the evo-devo approach. an answer to y. jin and y. meng : *Evolutionary Developmental Robotics – The Next Step to Go*, *Newsletter of the Autonomous Mental Development Technical Committee*, 8(2) :8–9.
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence without reason. In Myopoulos, J. and Reiter, R., editors, *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91)*, pages 569–595, Sydney, Australia. Morgan Kaufmann.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or, the preservation of favoured races in the struggle for life*. John Murray, London :.
- Dennett, D. C. (1995). *Darwin’s dangerous idea : evolution and the meanings of life*. Simon & Schuster, New York :.
- Eiben, A. and Smith, J. (2003). *Introduction to Evolutionary Computing*. Natural Computing Series. Springer.
- Elena, S. and Lenski, R. (2003). Evolution experiments with microorganisms : the dynamics and genetic bases of adaptation. *Nature reviews : Genetics*, 4(6) :457–469.
- Evans, L. T. (1984). Darwin’s use of the analogy between artificial and natural selection. *Journal of the History of Biology*, 17 :113–140. 10.1007/BF00397504.
- Fisher, R. (1930). *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford : Clarendon Press.
- Floreano, D. and Keller, L. (2010). Evolution of adaptive behaviour in robots by means of darwinian selection. *PLoS Biol*, 8(1) :e1000292.
- Godfrey-Smith, P. (2009). *Darwinian Populations and Natural Selection*. Oxford University Press.

- Gould, S. J. and Lewontin, R. C. (1979). The spandrels of san marco and the panglossian paradigm : A critique of the adaptationist programme. *ProcRSocLond*, 205 :581–598.
- Harvey, I., Husbands, P., Cliff, D., Thompson, A., and Jakobi, N. (1997). Evolutionary robotics : the sussex approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 20 :205–224.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial system : an introduction with application to biology, control and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI : The University of Michigan Press,.
- Hu, T. and Banzhaf, W. (2010). Evolvability and speed of evolutionary algorithms in light of recent developments in biology. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2010 :1 :1–1 :28.
- Huneman, P. (2012). Computer science meets evolutionary biology : Pure possible processes and the issue of gradualism. In Pombo, O., Torres, J. M., Symons, J., and Rahman, S., editors, *Special Sciences and the Unity of Science*, volume 24 of *Logic, Epistemology, and the Unity of Science*, pages 137–162. Springer Netherlands.
- Kauffman, S. (1996). *At Home in the Universe : The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press, USA.
- Knuuttila, T. and Voutilainen, A. (2002). A parser as an epistemic artefact : A material view on models.
- Langton, C., editor (1989). *ALIFE I, Proceedings of the first international workshop of the synthesis and simulation of living systems*. Addison Wesley.
- Lenski, R. and Travisano, M. (1994). Dynamics of adaptation and diversification : a 10,000-generation experiment with bacterial populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(15) :6808.
- Lewontin, R. C. (1970). The units of selection. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1 :pp. 1–18.
- Mouret, J. B. and Doncieux, S. (2012). Encouraging behavioral diversity in evolutionary robotics : An empirical study. *Evol. Comput.*, 20(1) :91–133.
- Nolfi, S. and Floreano, D. (2000). *Evolutionary Robotics : The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines*. Cambridge, MA : MIT Press/Bradford Books.
- Nolfi, S. and Parisi, D. (1996). Learning to adapt to changing environments in evolving neural networks. *Adaptive Behavior*, 5(1).
- Paolo, E. A. D., Noble, J., and Bullock, S. (2000). Simulation models as opaque thought experiments. In Bedau, M. A., McCaskill, J. S., Packard, N., and Rasmussen, S., editors, *Seventh International Conference on Artificial Life*, pages 497–506. MIT Press, Cambridge, MA.
- Pinheiro, V. B. and Holliger, P. (2012). The xna world : progress towards replication and evolution of synthetic genetic polymers. *Current Opinion in Chemical Biology*, (0) :–.

- Pinheiro, V. B., Taylor, A. I., Cozens, C., Abramov, M., Renders, M., Zhang, S., Chaput, J. C., Wengel, J., Peak-Chew, S.-Y., McLaughlin, S. H., Herdewijn, P., and Holliger, P. (2012). Synthetic genetic polymers capable of heredity and evolution. *Science*, 336(6079) :341–344.
- Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie : Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog, Stuttgart.
- Reif, W.-E., Junker, T., and Hoßfeld, U. (2000). The synthetic theory of evolution : general problems and the german contribution to the synthesis. *Theory in Biosciences*, 119 :41–91. 10.1007/s12064-000-0004-6.
- Sterelny, K. and Griffiths, P. E. (1999). *Sex and Death : An Introduction to Philosophy of Biology*. University of Chicago Press.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236) :pp. 433–460.
- Waibel, M., Floreano, D., Magnenat, S., and Keller, L. (2006). Division of labour and colony efficiency in social insects : effects of interactions between genetic architecture, colony kin structure and rate of perturbations. *Proceedings of the Royal Society B*, 273 :1815–23.
- Waibel, M., Keller, L., and Floreano, D. (2009). Genetic team composition and level of selection in the evolution of cooperation. *Trans. Evol. Comp*, 13(3) :648–660.
- Waters, C. K. (1986). Taking analogical inference seriously : Darwin’s argument from artificial selection. *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1986 :pp. 502–513.
- Wilson, J. (1999). *Biological Individuality : The Identity and Persistence of Living Entities*. Cambridge Studies in Philosophy and Biology. Cambridge University Press.
- Winsberg, E. (2009). A tale of two methods. *Synthese*, 169(3) :575–592.