

Université Denis Diderot Paris VII



Robotique Évolutionnaire et Biologie de l'Évolution : quels liens?

Simon Carrignon

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master LOPHISS

Sous la direction

Rapporteurs : Philippe Huneman, Michel Morange

Année académique 2011-2012

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Algorithmique Évolutionnaire, histoire et influences	2
1.2	Le voyageur de commerce	5
1.3	La Robotique Évolutionnaire	7
2	L'évolution des êtres vivants	10
2.1	Histoire et principes de la théorie de l'évolution	10
2.1.1	Descente avec modifications	11
2.1.2	Hypothèse de la Sélection Naturelle	13
2.1.3	Théorie synthétique de l'évolution	14
2.2	Problèmes et réflexions actuels en biologie théorique de l'évolution .	16
2.2.1	Niveaux et unités de sélection	16
2.2.2	Population Darwinienne	20
2.3	Conclusion	24
3	Méthodes d'investigations : expériences, modèles et Robotique	25
3.1	Méthodes et outils traditionnel	25
3.1.1	L'analogie Sélection artificielle & Sélection Naturelle	25
3.1.2	Les expériences de pensée	26
3.1.3	Les modèles et simulations informatiques	26
3.2	Une nouvelle méthode, la Robotique Évolutionnaire ?	29
3.2.1	La Robotique Évolutionnaire	29
3.2.2	Challenges et méthodes alternatives, évolution non dirigée et « sans but »	36
3.2.3	Qu'apporte-t-elle ?	42
4	Double réflexion sur la notion d'individu	43
4.1	L'individu en Biologie	43
4.2	l'individu en Robotique Évolutionnaire	43
5	Conclusion	46

Chapitre 1

Introduction

1.1 Algorithmique Évolutionnaire, histoire et influences

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 AE, en anglais *Evolutionary Computation, EC*)¹. Sous cette étiquette sont regroupées des méthodes apparues plus ou moins parallèlement dans les années 60-70, dont les plus connues sont les Algorithmiques Génétiques (Holland, 1975) et les Stratégies Évolutionnaires (Rechenberg, 1973)².

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 transporte³, pourquoi ne pourrait-elle pas servir pour programmer des outils et calculer des solutions à des problèmes aussi différent que de trouver le plus court chemin entre des villes (le fameux problème du voyageur de commerce dont nous reparlerons plus tard) ou l'agencement optimal de composants électroniques sur une puce ?

Cette intuition Turing 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). L'enfant devra ensuite avoir les mécanismes d'apprentissage capable de correctement le faire passer au stade adulte. Ainsi il n'y aura pas besoin de reprogrammer toutes les capacités des adultes mais simplement les méthodes d'apprentissages qui permettront aux enfants de les acquérir. Le problème est donc, selon Turing, dé-

1. Nous reprenons ici la traduction utilisé par Schoenauer (2009) et ne faisons pas non plus de distinction entre le terme *évolutionnaire* et le terme *évolutionniste*, que ce soit lorsque l'on parle d'Algorithmique Évolutionnaire ou de Robotique Évolutionnaire, l'un comme l'autre aurait pu être utilisé.

2. Pour une brève introduction en français sur l'Algorithmique Évolutionnaire, son histoire et ses diverses sous-composantes, voir Schoenauer (2009), pour une introduction complète et en anglais voir Eiben and Smith (2003).

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

composé en deux tâches : le processus d'apprentissage et la conception de la machine-enfant. Pour trouver la bonne « machine enfant », il imagine une suite d'essais/erreurs comparable, toujours selon lui, à l'évolution. Dans un premier temps une machine enfant sera conçue, à laquelle un enseignement sera dispensé. En fonction des résultats de cet enseignement « il sera possible d'essayer une autre [machine-enfant] et voir si elle est mieux ou moins bien. » Ainsi, par itération et accumulation de tests, de jugements de qualité et de modifications de la machine initiale, il serait possible de trouver la bonne machine capable de se développer en une « machine adulte » à la complexité proche de l'esprit humain.

Turing voit « un lien évident entre ce processus et l'évolution », lien que les égalités suivantes illustrent très bien :

Structure de la machine enfant	=	Matériel acquis par hérédité
Changement dans la machine enfant	=	Mutations
Sélection Naturelle	=	Jugement de l'expérimentateur

(Turing, 1950, p. 456)

Cette évolution, ajoute-t-il, « l'expérimentateur, par l'exercice de son intelligence, serait capable de l'accélérer ». Et voici déjà réunis tous les ingrédients que les acteurs de l'algorithmique évolutionnaire reprendront vingt ans plus tard.

Nous reviendrons plus en détails sur la structure de la théorie de l'évolution dans le chapitre 2 mais il est intéressant dès maintenant de noter comment la théorie de l'évolution peut être, et a été, sujette à des entreprises « d'axiomatisation ». Bon 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. On comprend bien que le minimalisme et le caractère formel de ces recettes en fait des candidates idéales pour être transcrites en algorithmes. Elle apparaissent comme un procédé simple pour résoudre des problèmes complexes et il n'est pas surprenant que dès la naissance de l'informatique ses acteurs, adeptes d'automatisation avaient pressenti leur potentiel et avaient eu envie de les reprendre à leur compte. Ils avaient à leur portée un « solveur universel » (en anglais *universal solver*) capable de trouver automatiquement les solutions à tout —ou au moins une large gamme— de problèmes possibles. Ils n'y auraient plus à construire les solutions à chaque problème rencontré, mais juste à trouver un moyen d'informatiser le processus évolutif. Turing l'avait bien vu et c'est ce que les chercheurs en Algorithmique Évolutionnaire ont fait et dont nous verrons une illustration dans la suite de l'introduction avec le problème du voyageur de commerce.

Il serait tentant de conclure que Darwin, Turing et les chercheurs en Algorithmiques Évolutionnaires aient tous eux la même intuition et confiance en

[...] cette force qui adapte lentement et merveilleusement bien chaque forme aux plus complexes relations de la vie.
(Darwin, 1859, ch. 15)

Mais savoir si ils parlent effectivement de la même chose, du même processus, n'est pas si simple à admettre, et est une des questions à laquelle nous essayerons d'apporter certaines réponses dans ce mémoire.

Parallèlement à cette intuition turingienne quasi-visionnaire de l'applicabilité de la « force darwinienne » à l'informatique, l'éclosion de ces méthodes d'Algorithmique Évolutionnaire dans les années 70 se comprend d'autant mieux si elle est mise en parallèle avec l'histoire de la Biologie de l'époque. Nous reviendrons plus en détails sur cette histoire dans la section 2.1 mais pour comprendre l'avènement de l'AE il nous

paraît judicieux de souligner qu'à la même époque, la Biologie était marquée par la fin, l'adoption et la reconnaissance de la Synthèse Moderne de la théorie de l'évolution par l'ensemble de la communauté scientifique. Cette Synthèse Moderne, appelée aussi Théorie Synthétique de l'Évolution d'après le titre du livre de Huxley (1942), l'un des acteurs de l'époque, désigne une période entre les années 1930 à 1960⁴ pendant laquelle un ensemble de découvertes, de modèles et de théories biologiques ont vu le jour. Cette époque a non seulement été témoin de la réconciliation des lois de Mendel de transmission (discrète) des caractères génétiques avec l'évolution (graduelle) des êtres vivants selon Darwin et son principe de Sélection Naturelle, mais elle a aussi été l'occasion d'affiner et d'agréments la théorie de tout un arsenal d'outils mathématiques et de modèles statistiques et conceptuels.

Là où il n'y avait que des idées et des hypothèses venaient désormais se greffer des équations, des chiffres et des tables statistiques, bien plus précises 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 (1932) offraient l'outil parfait pour illustrer les espaces de recherche des solutions avec lesquelles jonglent les ordinateurs⁵. Avec cette arrivée du langage de l'optimisation et de la théorie de l'information en biologie (Maynard Smith, 1978), l'application et l'échange de concepts et de procédés a pu se faire et de nouvelles méthodes d'explication explorées⁶. Le rapport entre cette Synthèse Moderne arrivée à maturité et l'émergence de l'Algorithmique Évolutionnaire est étroit. La première a offert à la seconde les outils parfaits pour que puissent être calqué le vocabulaire de la biologie sur des problèmes diverses et abstraits afin d'essayer de les résoudre en suivant une méthode « universelle ». Cette superposition rendant ainsi possible le rapprochement des vues des deux protagonistes de la phrase de Maynard Smith (2000, p. 179) : « [1]à où un ingénieur voit du design, un biologiste y voit la sélection naturelle. ».

Néanmoins et comme nous le verrons plus en détails dans la partie 3.2.3 de ce mémoire, il ne faudrait pas que ce rapprochement marque trop profondément les disciplines d'Algorithmique Évolutionnaire, et si la Synthèse Moderne a été un guide et une base de départ idéale, elle ne doit pas être un entrave et les critiques qui lui sont faites doivent être étudiées et testées avec sérieux.

De plus, bien que fructueux, ce pont jeté entre problèmes informatiques et biologie de l'évolution est avant tout conceptuel et abstrait et la majeure partie du temps perçu comme à sens unique par les chercheurs en informatique. L'Algorithmique Évolutionnaire « puise son inspiration du processus de l'évolution naturelle » annonce Eiben and Smith (2003, p. 1), et presque tout les auteurs de la discipline. Ainsi le lien semble souvent se réduire à de simples emprunts de langage. C'est pourquoi avant d'introduire la discipline qui nous intéresse dans laquelle l'abstraction s'estompe un peu, l'exemple classique en informatique théorique et en optimisation qu'est le prob-

4. Les dates exactes de la Synthèse Moderne peuvent varier suivant les auteurs, dépendamment de si la phase « théorique » est prise en compte ou non. Pour une revue critique de l'histoire de cette période voir (Reif et al., 2000), pour une très bonne et plus large introduction à la Synthèse Moderne et à l'histoire en français de la pensée évolutionniste en générale voir Gayon (1992).

5. Ces paysages adaptatifs, plus souvent appelés « fitness landscapes » ou espace de recherches en sciences computationnelles se révélèrent si pertinents conceptuellement qu'ils sont devenus un élément incontournable du vocabulaire de l'Algorithmique Évolutionnaire encore et toujours présentés dès l'introduction des « textbooks » de la discipline (Eiben and Smith, 2003, p. 12).

6. Nous reverrons plus en détails dans la partie 2.1 les critiques, la valeur et la portée explicatrice de ces modèles d'optimisation et des modèles en général, notamment à la lumière de l'approche sémantique des théories scientifiques de van Frassen comme l'a fait (entre autre) Beatty (1980) pour la biologie. Nous ne les citons ici que pour souligner le rapprochement qui s'opéra pendant le milieu du XXe siècles entre biologie et sciences computationnelles.

lème du voyageur devrait nous aider à mieux comprendre et éclairer la nature de cette superposition linguistique entre informatique et biologie, tout en nous donnant l'occasion d'illustrer la catégorie de problèmes que peuvent aider à résoudre les techniques d'Algorithmique Évolutionnaire.

1.2 Le voyageur de commerce

Dans ce problème bien connu des mathématiciens et informaticiens, un voyageur doit passer par un ensemble de villes en traversant chacune une seule fois. Le but est pour lui de parcourir le moins de kilomètres possibles (d'optimiser au mieux son trajet). Comme souvent en informatique, la meilleure et plus sûre façon de trouver la solution à ce problème et de tester tous les trajets possibles pour trouver le plus court parmi eux. L'inconvénient dans ce cas est que le nombre de trajets possibles peut très vite devenir très, très important. Ajouter une ville par laquelle notre voyageur doit passer ce n'est pas ajouter *un* nouveau 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 itinéraire c'est obtenir 4320 nouveaux trajets à tester. Le problème est dit NP-complet, et même des ordinateurs des milliards de fois plus puissants que le plus puissant des ordinateurs d'aujourd'hui mettraient plusieurs fois l'âge de l'univers pour énumérer toutes les solutions possibles avec une 50aines de villes.

C'est là que les algorithmes génétiques entre en jeu. Pour comprendre comment, d'abord la correspondance entre le problème et les termes biologiques doit être faite.

Dans notre situation le but est de trouver le trajet le plus court, la « solution » du problème sera donc un trajet, autrement dit une suite de villes à traverser (par exemple Lyon, Marseille, Paris et Grenoble). Dans le monde biologique il n'y a pas de « solutions » à proprement parler mais plutôt un « résultat » : des individus adaptés à leur environnement. Pour simplifier et dans la lignée des architectes de la Synthèse Moderne, l'individu est considéré comme réductible à son génome. Nous dirons ainsi –dans une grossière simplification qui ne veut pas rendre compte d'une réalité du monde du vivant mais simplement en extraire une heuristique utile, que : le résultat (les « solutions ») de l'évolution est un ensemble de génomes qui codent pour des individus adaptés à leur environnement⁷. Notre solution numérique, notre trajet, sera donc identifié dans la biologie à ces génomes. Dans ce cas précis il est aussi facile de faire correspondre ces deux entités (le génome et le trajet) au niveau de leur représentation puisque notre trajet peut très simplement être encodé sous la forme d'une chaîne de caractères très similaire aux séquences de nucléotides que l'on retrouve dans l'ADN (un trajet Lyon→Marseille→Paris→Grenoble pourra facilement être représentée par une chaîne LMPG).

Si l'on continue notre analogie avec la biologie : que s'est-il passé dans la nature pour que soient produites ce que nous venons de définir comme les « solutions », à savoir des génomes adaptés à leur environnement ? D'après Darwin et la Synthèse Moderne c'est la Sélection Naturelle, autrement dit le fait qu'en moyenne les individus mieux adaptés ont plus de descendants, qui se charge du travail. Mais que signifie *mieux adaptés* dans notre cas ? Il s'agit simplement d'être plus proche de la meilleure solution possible ; à savoir, du plus court trajet. Ainsi « être adapté », pour un trajet,

7. Nous tenons à insister encore ici sur la valeur heuristique de cette simplification, qui, et nous le reverrons, a depuis longtemps montré ses faiblesses et d'ailleurs assez paradoxalement de façon particulièrement probante en algorithmique évolutionnaire, cf Huneman (2012).

signifiera « être le plus court possible ». On identifie cette fois-ci la *fitness* d'un individu biologique à la longueur du trajet codé par notre suite de villes. Les entités élémentaires sont là, reste à définir les mécanismes qui vont les manipuler. La théorie de l'évolution nous dit que les génomes les mieux adaptés ont plus de chances de se retrouver dans les générations futures ; l'algorithme évolutionnaire va donc donner plus de chance aux listes de villes les plus courtes d'être présente à la génération suivante. L'algorithme (celui qui l'a conçu) « sélectionnera » donc de préférence les trajets les plus courts⁸.

Dans la nature, une fois cette sélection faite et lors de l'apparition de ce que les biologistes appellent une *nouvelle génération*, les descendants présentent des variations par rapport à leurs parents. Ces variations sont dues à de nombreux facteurs : environnementaux, développementaux, génétiques... Mais compte tenu du fait que l'analogie ne repose ici que sur le « génome », seules les facteurs de variation génétique seront retenus. Ceux-ci sont essentiellement : des croisements entre individus de sexe opposés (si reproduction sexuée il y a, de transfert horizontal sinon) et des mutations. Ce sont ces deux mécanismes que l'Algorithme Évolutionnaire retiendra et reprendra pour brasser, muter et croiser les listes de villes⁹. Deux trajets pourront ainsi être croisés pour n'en former qu'un seul, une ville remplacée par une autre de façon aléatoire¹⁰...

Ainsi au fil des générations un certain nombre de « solutions » seront testées, et moyennant le réglage adéquat des différents paramètres de l'algorithme (évolution du taux de mutation, nombre de croisement, pressions sélective, ré-injection de nouveaux individus... le réglage de ces paramètres, dont nous reparlerons, et d'une importance cruciale) il suffira de quelques itérations du processus pour qu'une solution satisfaisante sera trouvée. Ainsi en partant d'un ensemble limité de listes de trajets choisies aléatoirement, par « évolution artificielle », en usant des différents mécanismes mis à jours pas les biologistes comme actifs dans la nature, une très bonne solution sera trouvée. Qui ne sera peut-être pas la meilleure solution mais s'en approchera suffisamment pour offrir un résultat satisfaisant¹¹.

Il ne s'agit ni plus ni moins que d'effectuer un parcours « dirigé » dans le paysage adaptatif de tous les trajets possibles en reprenant les mécanismes utilisés par la nature pour parcourir les paysages adaptatifs des êtres vivants. Ce parcours « dirigé » illustre très bien le rapprochement entre théories de l'optimisation et biologie de l'évolution que nous avons évoqué plus haut et souligne comment il peut donner des résultats fructueux tout révélant la distance qui peut séparer les entités manipulées¹².

8. Le dosage de cette sélection est d'une importance capitale en Algorithmique Évolutionnaire. Ne sélectionner que les meilleurs, et l'évolution s'arrête très vite, loin de la solution optimale, ne sélectionner qu'aléatoirement et l'évolution n'atteindra jamais de solution intéressante dans un temps humainement concevable.

9. Cette limitation de la variation aux facteurs génétiques est sans doute une source de problème que rencontre le projet de l'AE, mais nous reviendrons dessus dans la partie 3.2.3.

10. On peut noter que tout comme en biologie, certaines contraintes s'imposent. En effet certains croisements de trajets comme certains remplacement de villes ne sont pas « viables » puisque le voyageur doit passer par toutes les villes. Si, par exemple, lors d'un croisement nous reprenons les cinquante premiers pourcent du génome d'un parent et les cinquante derniers pourcent du génome du second parent pour obtenir mon nouvel individu, et si les génomes respectifs des parents sont LMPG et PGML, j'obtiendrais un individu LMML qui ne sera pas « viable ».

11. En réalité il a été prouvé mathématiquement que certains réglages de ce genre d'algorithmes garantissent de trouver la meilleure solution, il s'agit en suite d'un compromis entre temps de calcul et valeur de la solution, mais ceci dépasse le cadre de ce travail.

12. Pour une introduction complète à l'Algorithmique Évolutionnaire et à ses divers résultats et applications cf : Eiben and Smith (2003).

1.3 La Robotique Évolutionnaire

Il a ensuite à nouveau fallu attendre une vingtaine d'années que ces méthodes d'informatique évolutionnaire fassent leurs preuves, que leurs fondements mathématiques s'affinent et qu'en parallèle la robotique évolue (ou du moins change d'approche comme nous le verrons avec Brooks (1991)), 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 où l'analogie avec la biologie est lointaine et se borne souvent, comme nous l'avons vu précédemment avec l'exemple du voyageur de commerce, à des emprunts de vocabulaire (l'individu étant une suite de ville bien différentes de ce que peut être un individu biologique). 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'appliquent sur les systèmes à concevoir sont donc *a priori* les mêmes que celles auxquelles sont soumis les êtres vivants. De plus, les tâches que ces « agents¹³ » doivent effectuer ressemblent beaucoup aux comportements que peuvent avoir les êtres vivants dans leur activité quotidienne. Le chercheur en robotique veut que son robot soit capable de se déplacer dans l'environnement tout en évitant les obstacles, de transformer et d'échanger avec cet environnement pour assurer son autonomie énergétique, sa sécurité, de communiquer et se synchroniser avec d'autres agents pour résoudre des tâches distribuées et complexes qu'il ne pourrait pas accomplir seul, etc..

L'analogie est cette fois-ci clairement plus forte entre les individus biologiques et les robots. La phrase de Maynard Smith (2000) « [L]à où un ingénieur voit du design, un biologiste y voit la sélection naturelle. » peut ici être reprise et précisée par : « Là où les biologistes veulent comprendre comment ont pu évoluer cette multitude d'entités autonomes et adaptées à de nombreux environnements que sont les êtres vivants, les roboticiens veulent savoir comment construire des entités autonomes et adaptées à de nombreux environnements. ». L'analogie apparaît clairement dès l'énoncé du problème et à deux niveaux : les caractéristiques des entités étudiées sont les mêmes (autonomie et adaptation), et l'environnement dans lequel agissent ces entités est lui aussi le même (le monde physique)¹⁴.

Une fois fait le constat de cette proximité entre les problèmes que veulent résoudre les roboticiens via la Robotique Évolutionnaire et les mécanismes qu'essayent de comprendre les biologistes de l'évolution, ne serait-il pas intéressant de voir dans quelle mesure les résultats obtenus par les uns pourraient être utiles aux autres ? L'affirmation d'un chercheur en Robotique Évolutionnaire démontrant que « pour obtenir des

13. Nous utiliserons le terme *agent* dans sa version naïve et intuitive utilisée notamment en intelligence artificielle dans laquelle un agent peut être : toute entité capable de percevoir son environnement et d'agir dessus. Cette définition a le mérite d'inclure aussi bien les robots, des programmes simulés ou les êtres vivants. Pour une discussion plus approfondie sur la définition d'*agent* voir Barandiaran et al. (2009).

14. Il y a toute de même un trou dans l'analogie qui est encore difficilement comblé par la Robotique évolutionnaire, l'évolution de la morphologie. En effet nous ne traiterons ici que de l'autonomie et de l'adaptation comportemental des robots comme critères à atteindre par évolution artificielle. Hors chez les êtres vivants la morphologie de ceux-ci évolue aussi. Cette limitation est souvent citée comme objectif futur à surpasser par les chercheurs, mais il est pour le moment techniquement très difficile de faire évoluer conjointement la morphologie et le comportement. Il existe néanmoins quelques tentatives pour palier ce problème : certains programmes de recherche qui couplent « swarm intelligence » et évolution artificielle essayent de suivre la piste des organismes multicellulaire, certains travaux tel ceux de Sims choisissent de simuler entièrement l'évolution.

agents autonomes et adaptées à l'environnement réel il faut X » peut-elle être transcrite en « pour obtenir des être vivant adaptés à l'environnement il faut aussi X » ?

En effet, si comme l'écrit Eiben and Smith (2003) en conclusion de l'ouvrage de référence en AE :

[...] c'est avec la robotique évolutionnaire que les ingénieurs humains et les scientifiques s'approchent le plus près de l'évolution naturelle.
(Eiben and Smith, 2003, p. 264)

ne pourrait-on pas revoir la nature du lien qui connecte Biologie Théorique et Robotique pour que cette dernière devienne non seulement *méthode inspirée par* mais aussi *méthode inspirante pour* l'étude de l'évolution naturelle ?

En d'autres termes, si les mécanismes à l'œuvre dans les expériences de Robotique Évolutionnaire sont proches des mécanismes à l'œuvre dans le monde du vivant, les premières ne pourraient-elle pas servir de modèles pour comprendre et expliquer l'évolution telle qu'elle se passe dans la nature ?

Mais répondre à cette question n'est pas chose aisée quand on s'y penche avec attention. Car avant d'affirmer que la Robotique Évolutionnaire puisse servir d'outil (ou de « modèle ») pour mieux comprendre l'évolution, d'abord faut-il comprendre ce que c'est justement que « comprendre l'évolution ». Comment et quels outils existent pour le faire ? Est-ce seulement possible ?

Il nous faudra donc, avant d'aborder sérieusement la Robotique Évolutionnaire voir comment les biologistes ont tenté d'expliquer « l'origine des espèces ». Quelles étapes ont-ils suivit, quels outils (méthodologiques, épistémologiques) ont-ils à disposition pour le faire ? Nous verrons rapidement que ce problème à première vue spécifique à la biologie est en réalité un problème complexe derrière lequel se pressent bon nombre des grandes questions qui agitent la philosophie des sciences dans toute sa largeur. Nous choisirons de n'étudier que certaines propositions faites par les philosophes qui ont réfléchi spécifiquement sur la question et qui nous semblent pertinentes compte tenu de nos objectifs. Nous embrasserons notamment l'approche sémantique de van Fraassen et Suppes tel que l'ont adapté Beatty, Lloyd et Thompson à la biologie, pour bâtir un cadre de réflexion dans lequel développer notre argumentation.

Puis nous présenterons un certain nombre d'outils et de méthodes qui nous paraissent être cohérents avec l'approche sémantique. Nous montrerons les atouts et faiblesses de chacun. Nous verrons d'abord l'argument historique de l'explication de l'évolution par analogie avec la sélection artificielle qu'a utilisé Darwin. Nous verrons ensuite l'utilité des expériences de pensée, elles aussi souvent utilisées en biologie de l'évolution, nous terminerons l'étude des techniques par l'étude (centrale selon l'approche sémantique) des modèles en général ainsi que des modèles et des simulations informatiques en particulier (l'accent sera mis sur les modèles de vie artificielle).

Nous tâcherons ensuite, après avoir présenté plus en détails la Robotique Évolutionnaire, son histoire et ses réussites, de la positionner et de souligner ses apports, sa particularité et ses intérêts comparée aux outils pré-cités. Nous dégagerons ainsi sa valeur épistémique au sein du cadre dans lequel nous avons choisi de mener notre réflexion en essayant de montrer que la relation entre Biologie de l'Evolution et Robotique Évolutionnaire peut et doit se faire dans les deux sens.

Une fois que nous aurons démontré le rôle et la valeur 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 par les biologistes et surtout les philosophes de la biologie. Nous essayerons de montrer en mettant côte à côte la no-

tion d'individu tel qu'elle est utilisée actuellement en Robotique Évolutionnaire et les réflexions menées par les philosophes sur cette même notion d'individu, que les pistes lancées par ces philosophes pourraient s'avérer être de vraies solutions pour résoudre les problèmes que rencontre la Robotique Évolutionnaire.

Chapitre 2

L'évolution des êtres vivants

L'OBJECTIF de ce chapitre est d'essayer de présenter la théorie de l'évolution, sa structure, les problèmes qu'elle a pu et qu'elle peut soulever ainsi que différentes façon de l'aborder.

Pour atteindre cet objectif nous allons d'abord retracer grossièrement l'histoire de cette théorie, en insistant sur : la façon dont Darwin l'a énoncé et structuré, les problèmes que cette structure engendre et les outils déployés pour y répondre, que ce soit par Darwin lui même ou par ses opposants et ses successeurs. Nous nous appuierons en grande partie sur les travaux de Gayon (1992) et terminerons cette première partie en décrivant brièvement le consensus auquel ont abouti les recherches du XXe siècle dans le domaine.

Dans un second temps nous essayerons de dégager quelques points que les travaux des successeurs de Darwin n'ont pas résolus, afin de montrer que de nombreuses questions restent en suspens et qu'y répondre demande une attention toute particulière. Pour illustrer ce constat nous nous attarderons sur le débat à propos des unités et niveaux de sélection. Ce débat sera un bon moyen d'introduire les problèmes actuels posés par l'étude de la théorie de l'évolution et les différentes approches envisagées pour y répondre. Nous terminerons en présentant une de ces approches plus en détail, celle de Godfrey-Smith (2009).

2.1 Histoire et principes de la théorie de l'évolution

En 1859, Charles Darwin proposait une théorie pour essayer de rendre compte de la diversité des êtres vivants dans son livre l'Origine des Espèces. Pour lui cette théorie se résumait comme :

Une théorie de la descendance avec modification par la variation et par la Sélection Naturelle.

(Darwin, 1859, dernière édition, trad. Gayon (1992)).

et fut ensuite plus couramment appelée la *théorie de l'évolution par Sélection Naturelle*.

Pour bâtir cette théorie Gayon (1992) nous explique que Darwin propose et admet deux mécanismes :

- L'hypothèse de la Sélection Naturelle : autrement dit « la survie du plus apte ».
- La descendance avec variation, autrement dit « l'hérédité des différences individuelles » (Gayon, 1992).

L'admission de ces hypothèses, et donc de la théorie qui en découle, permet de rendre compte de : l'évolution des espèces dans le temps (avec chez Darwin une notion de « progression », « d'amélioration » des espèces) et de leur divergence les unes des autres. Mais cette théorie (et les hypothèses qu'elle présuppose), de par sa structure et son contenu, n'est simple ni à observer ni à démontrer. Surmonter ces difficultés et essayer de convaincre du bien fondé de ces théories fut l'une des tâches principales de Darwin, qu'il mena dans ses livres depuis l'Origine des Espèces jusqu'à ses derniers ouvrages. Nous verrons dans les parties qui suivent quelles étaient ces difficultés, en reprenant la structure de la théorie de l'évolution vue par Gayon (1992) et en détaillant les deux points que nous avons dégagés plus haut. Nous verrons dans le même temps pourquoi Darwin ne réussit pas tout à fait à mener à bien sa tâche dans les sections 2.1.1 et 2.1.2. Puis nous présenterons comment ses héritiers ont repris ses travaux pour essayer de terminer cette entreprise. Nous verrons à quels consensus les avancées faites dans la recherche en biologie et plus particulièrement sur la théorie de l'évolution ont abouti et dirons deux mots de la Synthèse Moderne qui a en grande partie rendue possible ces consensus ainsi que sur *la vision centrée sur le gène* (« *the gene eye view* » en anglais) dans la section 2.1.3.

2.1.1 Descente avec modifications

Avant toute chose, et pour que la sélection Naturelle puisse agir et donc l'évolution selon Darwin avoir lieu, il faut que les caractères qui déterminent la fitness des individus (c'est à dire leur degré d'adaptation à leur environnement¹) soient *transmis* à leurs descendants. Et non seulement ils doivent être transmis, mais pour qu'il y ait du changement, ils doivent aussi *varier*. Hors, ces variations et cette hérédité (la transmission), Darwin (il le concède lui même) ne possède pas de théorie satisfaisante pour en rendre compte. Comment les parents transmettent-ils leurs caractères à leurs descendants et pourquoi ces caractères varient-ils, sont des phénomènes encore assez mal compris à l'époque. Néanmoins Darwin bâtit sa théorie de l'évolution en présupposant un certain type de transmission et un certain type de variations très précis. Selon lui pour que l'évolution ait lieu il faut que les caractères transmis *varient* de façon aléatoire et *graduellement* chez les descendants. Par exemple : une population d'individus de taille X aura des descendants avec des tailles comprises entre $X - n$ et $X + n$ qui varient de façon quasi continue entre $-n$ et n . Ce sont ces variations aléatoires et continues sur lesquelles la Sélection Naturelle va pouvoir agir.

Ainsi pour que sa théorie générale de l'évolution tienne la route Darwin doit donc construire et accepter une théorie de l'hérédité qui présente les propriétés dont sa théorie de l'évolution a besoin que nous venons de présenter. De plus cette théorie doit être conforme aux nombreuses observations qu'il a faites dans la nature. Dans l'Origine des espèces il fera l'hypothèse de l'existence d'une telle théorie, en considérant que les mécanismes qui présentent ces propriétés existent mais qu'ils restent à trouver et comprendre. Puis, dans Darwin (1868), il développera sa propre théorie, en reprenant les anciens concepts de la *pangénèse*². Mais l'adoption de ces propriétés

1. La fitness est difficilement définissable en anglais donc encore plus difficilement traduisible en français. On parle souvent de *valeur sélective* mais nous conserverons souvent le terme anglais de *fitness*.

2. Dans la théorie de la pangénèse les individus accumulent dans leur cellules germinales des particules (gémules) de l'ensemble des cellules de leur corps. Ces particules serviront à reconstruire un nouvel individu lors de la reproduction. Il est à noter qu'avec cette théorie, Darwin conserve le concept lamarckien de transmission des caractères acquis, puisque les gémules s'accumulent toute la vie de l'individu et donc sont susceptibles de transmettre les caractères acquis pendant cette vie.

comme centrales à l'évolution et d'une théorie de l'hérédité qui possède ce type de propriétés pose plusieurs problèmes.

Dans un premier temps des problèmes théoriques. Un des détracteurs de Darwin, Jenkin, soutiendra en l'illustrant mathématiquement qu'une sélection agissant sur des variations continues qui se mélangent lors de la reproduction ne pourra que stabiliser ces variations autour de valeurs moyennes et n'aboutira pas à l'apparition de nouvelles valeurs moyennes (de nouveaux phénotypes). Il soutiendra aussi que l'apparition ponctuelle de nouveaux caractères aura de forte chance de passer inaperçue, les caractères nouveaux seront statistiquement "dilués" aux milieux des caractères existant et finiront par disparaître.

Ce sera pour Darwin la critique la plus sérieuse faite à sa théorie et il ne réussira pas vraiment à la surmonter. D'une part car elle est une conséquence directe des choix théoriques qu'il a fait vis à vis de l'hérédité et des variations qu'elle doit permettre, d'autre part car elle vient d'une personne dont l'approche scientifique est totalement différente de la sienne. En effet Jenkin est un ingénieur, beaucoup plus porté sur les mathématiques que Darwin, qui est plutôt un naturaliste classique, homme de terrain. Ceci rend à Darwin le défi adressé par Jenkin « un défi auquel assurément sa culture et son expérience propre, fort peu quantitatives, ne lui permettaient pas de se mesurer » (Gayon, 1992, p. 105). Ainsi, même si les critiques de Jenkin ont souvent (et à juste titre) été qualifiées de « pamphlet réactionnaire », elles ont eu le mérite de déplacer l'intérêt des scientifiques vers des problèmes théoriques profonds de la théorie de l'évolution. Cette critique a dressé un véritable « cahier des charges [...] au théoriciens futurs » (*ibid.*), les invitant à proposer « une description plus *rigoureuse* de ce qu'ils appellent variations » (*ibid.* p. 103, emphase d'origine) et ouvrant la voie de « bon nombre de thèmes caractéristiques de la future biométrie, et au-delà, de la génétique des populations » (*ibid.* p. 105).

Un second problème (non sans lien avec le précédent) que vont rencontrer les hypothèses de Darwin est le problème, plus empirique cette fois, de la redécouverte des lois de Mendel au début du XXe siècle. En effet, quelques décennies après la disparition de Darwin, les biologistes cellulaires montreront, en s'appuyant sur un très grand nombre d'expériences, que si il y a bien une transmission héréditaire de certains caractères via ce qu'il sera convenu d'appeler les gènes, ces caractères ne varient pas de façon continue chez les descendants, mais sont des caractères discrets qui ne peuvent qu'être hybridés selon certaines lois statistiques régulières. Cette constatation, avait déjà été faite à l'époque de Darwin par Gregor Mendel, mais était alors passée inaperçue. D'après ces observations, les caractères transmis par hérédité ne peuvent pas véritablement se « mélanger », ce qu'avait imaginé Darwin (1868) dans son livre « De la variation des animaux et des plantes sous l'action de la domestication » pour soutenir une théorie de l'hérédité en accord avec sa théorie de l'évolution. Les expériences des biologistes tranchaient : il n'y a pas de « gémules ».

Ainsi non seulement, la théorie de la *pangénèse* de Darwin était-elle fautive empiriquement, mais elle laissait place à une théorie génétique qui ne présente pas, à première vue, les propriétés nécessaires à l'évolution selon Darwin. Paradoxalement, c'est cette génétique qui offrira plus tard les propriétés capables d'articuler correctement la théorie de l'hérédité avec la théorie de l'évolution pour permettre de résoudre les problèmes soulevés par Jenkin.

2.1.2 Hypothèse de la Sélection Naturelle

Une fois une théorie de l'hérédité des variations individuelles admise (avec, comme nous venons de le voir, les problèmes que cela comporte), la sélection naturelle peut jouer son rôle que nous résumerons ainsi :

Les individus avec les variations offrant à ceux qui les portent la meilleure adaptation (ie les individus qui possèdent la meilleure *fitness*) vivront plus longtemps et/ou laisseront en moyenne plus de descendants.

Pour Gayon (1992, p. 22) c'est « l'hypothèse organisatrice » de la *théorie* de Darwin. Mais Darwin ne possède aucun *fait* la justifiant, aucune preuve directe de cette hypothèse, puisque l'action de celle-ci n'est perceptible qu'à des échelles de temps géologiques difficiles à appréhender et encore moins observables par les humains. Pour arriver à convaincre Darwin va donc devoir utiliser l'analogie avec la Sélection Artificielle.

Cette analogie, sur laquelle nous reviendrons un peu plus tard pour des raisons différentes (section 3.1.1), s'appuie sur les très nombreuses études d'éleveurs que Darwin a beaucoup étudiées. Dans ces études les éleveurs expliquent comment ils sont capables de transformer et faire diverger de beaucoup les espèces domestiques en sélectionnant certains spécimens particuliers selon des caractères qui les intéressent.

Pour Darwin, si les êtres humains, en appliquant ce genre de pression sélective explicite et directe, peuvent modifier les espèces vivantes domestiques, alors il doit exister une force analogue capable de modifier les espèces dans la nature. Une force qui pourrait rendre compte de la diversité et des adaptations de ces espèces. Cette force, qui agirait sur des variations transmises par hérédité comme nous l'avons vu et défini ci-dessus (section 2.1.1), Darwin l'appelle la Sélection Naturelle. Grossièrement résumé par nous il la décrit ainsi : les individus les mieux adaptés se reproduiront plus et auront plus de descendants dans les générations suivantes.

Il est intéressant de noter, car nous y reviendrons, qu'en définissant cette Sélection Naturelle Darwin insiste sur le fait que les variations qui vont, ou non, augmenter les chances de survie et de reproduction (la *fitness*) doivent être portées par les individus (individus qu'il identifie aux « organismes biologiques », identité dont nous reparlerons). Pourtant, que l'individu soit porteur des variations nécessaires à l'évolution n'est pas si évident qu'il n'y paraît. À l'époque déjà, Wallace, co-« découvreur » de la théorie de l'évolution par sélection naturelle, avançait que les variations étaient des différences entre des populations d'individus, et que la sélection portait sur ces populations, et non sur les individus qui les composent. Ce problème, qui préfigure les questions des unités de sélection est un problème toujours d'actualité et nous reviendrons plus amplement dessus dans la section 2.2.1.

Mais qu'importe pour le moment cette querelle et le niveau sur lequel peut opérer la sélection. Il n'en demeure pas moins qu'à l'époque, ni Darwin ni Wallace ne pouvait prouver cette hypothèse de la sélection naturelle. Cette preuve fera parti du legs de Darwin à ses successeurs et n'aura de cesse d'être pointée du doigt par ses détracteurs.

Il faudra attendre les biométriciens, et les nouvelles méthodes statistiques apportées par Galton, puis Pearson et Weldon, pour avoir ce qui se rapprocherait le plus des premières preuves mathématiques et empiriques de l'action de la Sélection Naturelle. Cette approche statistique de la théorie de l'évolution doit beaucoup, comme nous l'avons déjà évoqué, à la critique qu'avait soulevée, Jenkin. L'introduction de cette méthode et son développement vont fortement influencer toute la biologie de l'évolution, pendant presque 50 ans, jusqu'à la création de la génétique des populations dont nous reparlerons plus tard.

Ainsi, pour contrer Jenkin et asseoir théoriquement le bien fondé de la sélection naturelle, Pearson et Weldon vont développer tout un ensemble de techniques statistiques et empiriques pour essayer de rendre compte des effets de la Sélection Naturelle. En reprenant les travaux sur les distributions normales et les corrélations de caractères morphologique de Francis Galton, un cousin de Darwin souvent considéré comme un des pères fondateurs de l'eugénisme, ils vont tenter de montrer que les conditions de variations nécessaires à l'action Sélection Naturelle comme la pensait Darwin sont bien présentes dans la nature et que l'action elle-même peut être visualiser.

Dans une série des publications datant du début des années 1890 (voir par exemple : Weldon (1892)), ils vont montrer, en s'appuyant sur les analyses statistiques de Pearson de très haut niveau et sur les minutieux et rigoureux relevés morphologiques de Weldon, ce qu'ils considèrent comme *l'effet de la sélection naturelle* sur des populations de crabes. Pour ça ils vont devoir mettre au points certains tests statistiques dérivés de ceux de Galton pour :

1. Montrer que deux populations de crabes ne présentent pas de différences morphologiques d'un point de vue statistique et ont donc toutes les raisons d'être deux populations de la même espèce, à un détail près qu'ils vont illustrer dans le suite de l'étude.
2. Montrer que pour un certain caractère morphologique, une des population présente un dimorphisme établi statistiquement (dit autrement : pour ce caractère précis les variations ne sont pas réparties de façon normale autour de la moyenne mais sont en fait réparties comme la somme de deux distributions normales autour de deux moyennes statistiquement différentes).

Néanmoins ces résultats ne répondent pas directement aux critiques formulées par Jenkin. Si ils montrent que la sélection peut agir au niveau des individus et faire se déplacer certains caractères morphologiques, ils ne démontrent pas pour autant que les espèces peuvent durablement se modifier par ce biais et diverger véritablement. D'où les arguments de l'époque, faits par les « mutationnistes ». Ces derniers, reprenant les arguments de Jenkin (et aussi de Galton, ce qui est assez ironique compte tenu du fait que Weldon et Pearson aussi reprennent beaucoup d'outils galtonniens) continueront d'avancer que la sélection tel que décrite par Darwin ne peut que faire dévier les caractères morphologiques autour de constantes moyennes, fixes. Les traits phénotypiques des individus étant en réalité contrôlés par des « atomes » discrets, qui restent les mêmes dans l'histoire évolutive de l'espèce. Les changements ne peuvent qu'être apportés par des mutations brutales et importantes qui vont modifier ces atomes et déplacer ces caractères morphologiques. Ces critiques seront d'autant plus fortes et la position des biométriciens d'autant plus difficile à tenir que la redécouverte des lois de Mendel offrira aux mutationnistes l'appui empirique dont n'a jamais joui la théorie « gradualiste » envisagée par Darwin.

2.1.3 Théorie synthétique de l'évolution

Au début du XXe siècle la théorie de l'évolution affronte donc un problème. D'un côté Weldon et Pearson semblent démontrer statistiquement et empiriquement qu'une certaine évolution s'appuyant sur des variations graduelles est possible, d'un autre côté les études empiriques montrent que ces variations graduelles n'apparaissent que rarement voir pas du tout dans la nature, et qu'en réalité il n'y a que des caractères discrets qui s'hybrident selon les lois de Mendel. Par conséquent, pour les partisans de ce *mendélisme*, la sélection naturelle de caractères qui varient de façon continue (ce

qu'avait défini Darwin) ne peut pas faire évoluer les espèces. Ce sont, comme nous venons de le dire, les mutations ponctuelles de caractères discrets qui doivent être à « l'origine des espèces ».

Mais la donne va progressivement changer. En 1918, Fisher, dans un article central en génétique des populations (Fisher, 1918), démontre que le *gradualisme* nécessaire à la sélection naturelle de Darwin n'est pas incompatible avec des caractères mendéliens. C'est ainsi qu'avec Wright et Haldane ils vont, pendant la décennie qui suivit, réconcilier théoriquement et mathématiquement la ségrégation de caractères discrets de Mendel avec la sélection de caractères aux variations continues de Darwin.

Cette réconciliation mathématique s'avèrera au final une aubaine pour le darwinisme. Elle va offrir à ce dernier la théorie de l'hérédité qui faisait défaut à Darwin : la théorie génétique de l'hérédité mendélienne.

Suite à quoi s'en suivirent, entre 1930 et 1960 plusieurs décennies de « synthèse », au cours desquelles les différents domaines de la biologie vont être rattachés empiriquement et théoriquement à cette théorie de l'évolution « réconciliée ». Que ce soit en paléontologie, en écologie, en botanique, en génétique ou en zoologie, de nombreux livres parurent, pièces aujourd'hui centrales dans chacun de ces domaines, pour faire le lien entre la nouvelle biologie moderne de l'évolution et les différentes disciplines impliquées.

Cette période, et le paradigme scientifique qui en découla et que nous avons déjà vaguement évoqué en introduction, furent appelés la synthèse moderne (SM, souvent aussi appelée théorie synthétique de l'évolution, TSE, dans la littérature francophone) d'après le livre d'un de ses artisans : Huxley (1942).

Elle fut témoin de nombreuses avancées et a eu (et a toujours) un impact profond sur la biologie dans toute sa diversité. Nous ne rentrerons pas dans les multiples détails de cette riche époque. Néanmoins il convient d'en dire quelques mots, car à la fin de ces années de synthèse un certain consensus sur l'interprétation des phénomènes évolutif a émergé. Hors ce consensus aura une influence directe sur les méthodes utilisées en Robotique Évolutionnaire et sur l'approche biologique qui l'inspire. Il n'est donc pas inutile d'essayer de saisir *comment est apparu* et *quel est* ce consensus.

Les généticiens des populations (Fisher, Haldane, Wright...) en réconciliant Mendel et Darwin, ont remis le support de l'hérédité, le gène, au centre des recherches sur l'évolution. Fisher lui-même explique l'évolution comme des variations de *fitness* sur des variations de fréquences génétiques (Fisher, 1930). Il devenait ainsi possible de résumer l'évolution des êtres vivants à l'évolution de leur bagage génétique. Mieux encore, avec la découverte de l'ADN dans les années 50 le rêve réductionniste de la science moderne semblait accessible à la théorie de l'évolution. En effet, pour étudier cette dernière il suffit d'étudier des variations de fréquences de gènes. Hors les gènes sont portés par l'ADN, une molécule dont on peut théoriquement comprendre les propriétés chimiques, il suffit donc d'étudier les propriétés physico-chimiques de cette molécule pour comprendre l'évolution.

La force heuristique de cette idée réductionniste qui avance que comprendre l'évolution des gènes peuvent aider à comprendre l'évolution des êtres vivants, a probablement été un élément clef du succès de la synthèse moderne. Elle fut d'autant plus vite adoptée qu'elle présentait une structure, comme le souligne Griesemer (2002), isomorphe avec un schéma de l'évolution très influent au début du siècle : le wiesmanisme. Weisman avait en effet montré, dans l'optique d'éliminer les réminiscences lamarckiennes de la théorie de l'évolution du début du XXe, que seules les variations présentes dans les cellules germinales sont importantes. Les autres cellules de l'organisme, les cellules somatiques, n'ont pas de rôle évolutif particulier puisque les modifications

qu'elles peuvent subir ne sont pas transmises à la descendance.

Il y a donc une barrière entre la lignée des cellules germinales (le germen), qui sont transmises de générations en générations, et qui peuvent évoluer, et les cellules somatiques (le soma), qui ne sont que le produit de l'information contenue dans les cellules germinales et qui n'évoluent pas. Cette barrière est conceptuellement la même que celle faite par la synthèse moderne entre le génotype, dont les variations sont transmises de générations en générations, et le phénotype, l'expression de ce génotype, dont les variations ne sont pas transmises. La transition de l'une à l'autre allait donc de soi.

L'unidirectionnalité de cette barrière (l'information va du germen vers le soma, du génotype vers le phénotype, mais pas dans l'autre sens), qui permet le réductionnisme décrit plus haut, fut encore renforcée par l'établissement dans les années 70 du dogme centrale, proposé dans la lignée de Crick, par Jacob et Monod. Avec le dogme central la cellule, le phénotype, s'avérait bien le produit « chimique » d'une traduction du génome, irréversible, avec un sens (ADN→transcription→traduction→protéine) donné et unidirectionnel.

Le gènes sont ainsi devenus les agents principaux de l'évolution, la cellule n'était plus qu'un « véhicule » Dawkins (1976) pour les transporter. On pouvait résumer l'histoire évolutive des êtres vivants à l'histoire évolutive des gènes qui les composent. C'est « *the gene eye view* », comme fut baptisée cette vision de l'évolution. En tant que schéma cohérent elle fut d'abord proposée par Williams (1966) puis popularisée par Dawkins (1976). Sa remarquable force explicative, sa simplicité et sa puissance réductionniste lui ont très vite assuré un certain succès non seulement dans la communauté scientifique mais aussi auprès du large public.

Ainsi, quand à la fin des années 60 la synthèse moderne se terminait et entrait dans sa phase « institutionnelle », la « *gene eye view* » s'installait comme un élément central de celle-ci. En devenant le paradigme enseigné et adopté par tous, la SM a ancré au sein de la communauté scientifique au sens large (et plus seulement parmi les biologistes) les idées et concepts qu'elle avait mis près d'un demi siècle à établir. Inévitablement donc, fut diffusée et adoptée cette vision, indissociable de la SM, d'un organisme réductible à l'information génétiques qui le compose. C'est cette information génétique qui est porteuse des variations nécessaires à l'évolution et qui va les reproduire pour les transmettre de génération en génération. C'est donc elle la seule cible de cette évolution. C'est cette vision que vont reprendre telle quelle et qui va probablement permettre aux informaticiens de développer l'Algorithmique Évolutionnaire puis plus tard, la Robotique Évolutionnaire.

Mais la synthèse moderne et la « *gene eye view* » n'ont pas résolu tous les problèmes théoriques soulevés par les propositions de Darwin pour autant. Nous allons voir comment ceux-ci sont réapparus et ont été repris par les scientifiques et philosophes depuis les années 1970.

2.2 Problèmes et réflexions actuels en biologie théorique de l'évolution

2.2.1 Niveaux et unités de sélection

Dans la section 2.1.2 nous avons dit que, pour peu qu'ils transmettent leurs caractères à leurs descendants et que ces caractères varient, les « individus » les mieux adaptés vivront plus longtemps et auront plus de descendants. Ainsi générations après

générations les populations se verront composées de plus en plus d'individus mieux adaptés, les caractères divergeront, les espèces évolueront. Nous avons vu que cette définition a posé quelques problèmes quant à la nature des variations nécessaires, problèmes qui furent partiellement résolus par la synthèse moderne et la réconciliation du mendélisme avec Darwin. Mais la théorie de Darwin soulève d'autres questions. Dans un article majeur sur le sujet, Lewontin (1970) reprend cette théorie pour la formuler et la résumer dans des termes plus actuels de la façon suivante :

1. Dans une population des individus différents ont une morphologie, une physiologie et des comportements différents (variation phénotypique).
2. Des phénotypes différents ont des taux de survie et de reproduction différents dans des environnements différents (fitness différentielle).
3. Il y a une corrélation entre parents et descendants à chaque génération future (hérité de la fitness).

L'auteur explique que le niveau d'abstraction de cette définition n'impose pas l'organisme comme « individu ». N'importe quelle entité répondant aux trois critères que Lewontin énonce peut remplir ce rôle d'individu. Pour lui cette définition s'applique très bien aux différents niveaux d'organisation biologique. Les « individus » peuvent aussi bien être les cellules, les chromosomes, les gènes, les organes au sein d'un organisme, les organismes entre eux ou même les espèces d'organismes entre elles.

Déjà à l'époque de Darwin et comme nous l'avons brièvement évoqué, Wallace considérait que les populations et non les individus étaient sélectionnés, suggérant ainsi que la sélection pouvait agir à différents niveaux que celui envisagé par Darwin. Et en réalité, même si pour ce dernier, la pression de sélection ne peut porter que sur les variations des individus (individus qui sont pour lui des organismes multicellulaires), il considérera dans son livre *The descent of man* (Darwin, 1871), que les sociétés humaines (donc des *populations* d'individus biologiques) peuvent être soumises à une force similaire à la sélection naturelle qu'il avait initialement définie pour les organismes. Un peu plus tard, Weismann, dont nous avons déjà parlé pour ses travaux sur le germen et le soma, fut aussi un de ceux qui théorisa beaucoup cette idée que des populations puissent être sélectionnées.

Ainsi la question de savoir quelles sont les *unités* et à quels *niveaux* d'organisation biologique agit la sélection naturelle est une question aussi vieille que la théorie de l'évolution elle-même. Aujourd'hui désigné comme le débat sur les « unités et niveaux de sélection », ces réflexions ont connu un regain d'intérêt important à la suite de l'article de Lewontin. La crise du mendélisme était passée et la synthèse moderne avait fini d'offrir un cadre stable et un ensemble de théories et de modèles cohérents pour pouvoir réfléchir à ces problèmes. L'attrait pour ceux-ci repris d'autant plus vigoureusement qu'au sortir de la synthèse moderne était adopté, comme nous l'avons souligné dans la partie précédente, le consensus du « *gene eye view* », qui prend un parti très tranché sur ces questions des niveaux de sélection : la sélection agit sur les gènes et rien d'autre.

Nous avons vu dans la section 2.1.3 les apports et intérêts de cette vision mais elle fut néanmoins très vite l'objet de nombreuses critiques. Wimsatt (1980), par exemple, remettra en cause la vision de Williams (1966) (et de Dawkins (1976)), en argumentant qu'elle ne peut rendre compte de tous les phénomènes évolutifs en biologie. Pour lui la fitness des individus n'est pas réductible à la fitness des gènes qu'il possède, ces derniers interagissent de façon trop complexe et non linéaire entre eux. Gould (2002) écrira même, dans l'imposante synthèse de sa réflexion qu'est « La Structure de la Théorie de l'Évolution », que :

[...] la théorie de l'évolution centrée sur le gène était indéfendable. (Gould, 2002, p. 855)

Ces problèmes et visions divergentes sont nombreux et, comme l'écrit Gould dans le même ouvrage,

[o]n pourrait organiser la discussion sur ce sujet très difficile et très important d'une centaine de façons différentes. (*ibid.*, p. 833).

Il est donc difficile d'en faire une revue exhaustive. Lloyd (2012), dans son article qui essaye justement de faire cette revue exhaustive, considère qu'en réalité il serait plus judicieux de décomposer ce problème en quatre questions différentes qui sont en général mélangées dans la littérature sur le sujet. Pour elle l'important est de dégager :

1. quelles unités sont sélectionnées,
2. à quel(s) niveau(x) se situent ces unités,
3. qui bénéficie des évolutions produites par la sélection et
4. où se manifestent les adaptations acquises.

Analyser et dégager ces axes est une chose complexe et nous ne le ferons pas ici. Nous nous contenterons de considérer les 4 points ensemble sous le nom « niveaux et unités de sélection ». En revanche, pour illustrer comment et pourquoi ce débat a pu diviser et continue de mobiliser presque tout les biologistes contemporains, nous allons présenter quelques arguments et quelques pistes de réflexions qu'ont pu avancer certains chercheurs et philosophes depuis une quarantaine d'années.

Une des approches la plus reprise et admise depuis les années 60, puisqu'elle apporte en quelque sorte la réponse direct de la « *gene eye view* » à ces questions, est l'approche de Dawkins (1976) et Hull (1974). Pour clarifier le débat, ces deux auteurs proposent de distinguer les *intérateurs* (les *véhicules* pour Dawkins (1976)), qui agissent dans l'environnement et interagissent entre eux, des *réplicateurs*, qui se répliquent de générations en générations. Cette séparation offre, surtout à Dawkins, le moyen de construire une théorie de la Sélection Naturelle en accord parfait avec la Synthèse Moderne. Les réplicateurs sont pour lui les gènes, et ce sont eux, qui, transmis de parents à enfants, ont la propriété d'être « potentiellement immortels », d'après lui, et donc d'évoluer. Ceci reprend parfaitement bien le concept weismannien dont nous avons parlé de « la continuité du plasma germinatif » (Dawkins, 1976, p. 11). Les intérateurs, qu'il appelle des « véhicules », ne sont quant à eux que des transporteurs utilisés par les réplicateurs pour maximiser leur succès reproductif.

Mais malgré son rapide succès au sein de la synthèse moderne et ses nombreux avantages elle pose de certains problèmes qui furent très vite pointés du doigt. Par exemple, si Dawkins s'arrange pour « *définir* le gène d'une manière telle que [il] ne puisse pas vraiment ne pas avoir raison » (Dawkins, 1976, p. 33, emphase d'origine), en le décrivant comme :

[...] une unité génétique suffisamment petite pour durer pendant de nombreuses générations et se répandre sous forme d'une multitude de copies. (*ibid.* p. 32)

La réalité biologique de cette entité est loin d'être établie. De façon similaire, savoir à quels niveaux d'organisation biologique se situent les intérateurs et comment déterminer ce qui relève de l'intérateur de ce qui relève du réplicateur n'est pas chose aisée. Les recherches en biologies développementales n'ont-elles pas montré que parfois le contenu de la cellule au moment de la reproduction est bien plus important que l'information génétique de cette même cellule ? De même, si l'intérateur est un

individu pluricellulaire, quelle est la différence entre les cellules de cet organisme et les fourmis d'une fourmilière, l'interacteur est-il la colonie de fourmis ?

Pour pallier certains des problèmes de cette distinction dite de « Hull-Dawkins », Griesemer (2000) a proposé plus récemment le concept de « reproducteur ». Ce concept essaye d'aller au delà du schéma classique de Weismann et de la distinction lignée germinale/lignée somatique (et de son équivalent synthétique génotype/phénotype) en définissant l'unité élémentaire comme une unité de développement, capable d'assurer à la fois sa réplication et son développement. Cette définition permet d'intégrer génotype et phénotype ensemble en éliminant cette distinction qui, selon Griesemer (2000, 2002), pose problème.

D'autres critiques, comme celle de Wilson and Sober (1989), argumentent qu'on ne peut pas traiter différemment « les gènes d'un individu [...] des individus parmi un groupe ou des espèces au sein d'une communauté » et proposent, entre autre, le concept de superorganisme pour résoudre ce problème. Bouchard (2009, 2011) reprend cette réflexion en soutenant qu'on ne peut comprendre les traits sur lesquels agit l'évolution en analysant uniquement l'ADN (et par extension les gènes) d'un organisme car bon nombre de propriétés à l'impact non négligeable sur la fitness des individus émergent de l'interaction d'organismes d'espèces totalement différentes. Pour lui la notion d'individu en biologie n'est pas claire et, « si on ne peut pas se mettre d'accord sur les frontières et le nombre d'individus de nombreux systèmes biologiques, on ne peut pas obtenir de notions intéressantes de [ce que sont] des populations » (Bouchard, 2011, p. 17). Il s'appuie sur (Wilson and Sober, 1989) pour dire qu'un individu doit être « une entité intégrée fonctionnellement » (Bouchard, 2009, p. 3). Cette définition permet nous seulement de penser les colonies d'animaux sociaux comme des individus mais aussi les cas de symbiose, certains écosystèmes très intégrés ou encore des systèmes biologiques moins « paradigmatiques » (Bouchard, 2009, 2011). Il voit ainsi écosystèmes et symbioses comme des « individus multi-espèces » (Bouchard, 2009, p. 10) sur lesquels, puisqu'ils présentent « des traits biologiques émergents qu'on ne peut pas réduire à la simple agrégation des phénotypes des individus qui composent ces colonies » la sélection peut agir même si « ces phénotypes ne sont pas "transmis" par la seule hérédité génétique » (*ibid.*, guillemets d'origine).

Okasha (2006) essaye lui de voir dans quelles mesures certains modèles mathématiques peuvent s'appliquer à rendre compte de phénomènes de sélection agissant à des niveaux d'organisation différents.

Nous reverrons plus en détail dans la partie suivante, l'approche du problème par Godfrey-Smith (2009), mais prenons un peu d'avance en introduisant déjà certains remarque qu'il avance à propos des problèmes traités dans cette partie. Dans son ouvrage dont nous reparlons, Godfrey-Smith critique les « recettes » telle celle que nous avons reprise de Lewontin (1970) en début de chapitre et développe un cadre un peu différent et plus général qui permet de réfléchir aux questions d'unité et niveaux de sélection. Dans son cadre il considère que même les productions culturelles (Godfrey-Smith, 2009, p. 147) peuvent évoluer selon une logique darwinienne. Son schéma permet de surcroît d'intégrer différents niveaux de sélection tandis qu'il soutient que la notion de réplicateur de Dawkins n'apporte rien. Il critique aussi l'approche « *gene eye view* » (Godfrey-Smith, 2009, pp. 129-145) qui d'après lui simplifie le problème des niveaux et unités de sélection en sacrifiant la justesse au profit de la métaphore d'une évolution composée d'« agents » avec des objectifs et des stratégies. Cette métaphore n'a d'autre raisons d'être, pour Godfrey-Smith, que des attrait psychologique. Ainsi, centrer l'évolution sur le gène est une erreur. Pour lui ;

[...] plutôt que d'être la plus claire et plus fondamentale unité de sélection, les gènes eux-mêmes la plupart du temps sont des individus darwiniens marginaux. (Godfrey-Smith, 2009, p. 145)

Ainsi, comme nous venons de le voir, les approches au problème des niveaux de sélection sont multiples. Parmi les différents courants que nous avons évoqués, des chercheurs avancent que l'évolution peut être comprise et réduite à l'étude d'une entité simple comme le gène (Dawkins, 1976; Dennett, 1995), d'autres soutiennent que c'est impossible et qu'il faut étudier des niveaux supérieurs (Gould, 2002; Wilson and Sober, 1989; Bouchard, 2009), d'autres encore avancent que ces visions sont similaires, complémentaires et non exclusives. Quoiqu'il en soit le problème est loin d'être résolu et le débat continue. Pour essayer de résoudre ces questions et pour tester les limites, les atouts et les faiblesses des différentes solutions avancées, les scientifiques et les philosophes doivent développer tout un arsenal d'expériences de pensées, de modèles mathématiques, informatiques ou encore d'expériences empiriques. Du choix de ces méthodes en général dépendent beaucoup la perception du problème et les solutions envisagées. Après avoir vu plus en détails le cadre de réflexion de Godfrey-Smith (2009) qui nous semble pertinent nous verrons ces différentes méthodes que les scientifiques utilisent pour explorer l'évolution.

2.2.2 Population Darwinienne

Le débat sur les unités et niveaux de sélection est donc, comme nous venons de le voir, assez vaste et mobilise toutes les composantes de la biologie de l'évolution. L'importance de ce débat tiens essentiellement du fait que se sont les entités de base du processus évolutif qui sont au cœur de cette réflexion. En posant la question de « qu'est-ce qui évolue et à quel niveau », une certaine conception de ce qu'est l'évolution au sens large est sous-entendue et doit être adoptée. De même, les moyens à mettre en œuvre pour l'étudier, la nature des explications et des solutions à apporter dépendront de la position choisie vis à vis de ces questions. En réalité autour de celles-ci l'ensemble de la biologie de l'évolution peut s'articuler. Dans cette partie nous allons présenter plus en détails les travaux de Godfrey-Smith (2009) qui a, dans cette optique, revu et parfois redéfini certains de ce qu'il appelle les « thèmes centraux » (Godfrey-Smith, 2009, p. 4) de la recherche sur l'évolution et qui reprennent bon nombre des éléments du débat sur les unités et niveaux de sélection, tout en offrant un élégant moyen d'y réfléchir.

Dans un premier temps Godfrey-Smith propose de se pencher sur les « recettes », comme il les appelle. Les recettes sont pour lui les descriptions assez traditionnelles telles que celle que nous avons vu de Lewontin dans la section 2.2.1 et avec lesquelles les biologistes essayent de synthétiser les caractéristiques essentielles de l'évolution naturelle. Mais selon Peter Godfrey-Smith (PGS), ces recettes, qui veulent résumer dans un énoncé simple et court les conditions nécessaires, « essentielles au processus » de l'évolution selon Darwin, ont un problème. L'auteur soutient qu'en poursuivant ce but, les recettes mixent en réalité deux objectifs théoriques différents en une seule formulation. Selon lui, ces deux objectifs, bien que d'importances capitales pour construire et affiner la théorie de l'évolution, sont chacun très complexes et dans la pratique très difficilement conciliables. Les auteurs de ces recettes veulent à la fois (1) décrire *tous les cas véritables* d'évolution par sélection naturelle, et en même temps, (2) décrire un *mécanisme causal transparent*. L'idée que critique PGS est que les chercheurs veulent à la fois rendre compte de tous les cas d'évolution ayant eu lieu sur terre tout en dégagant des mécanismes généraux, un « algorithme » simple et universel. Ce désir

engendre selon Godfrey-Smith de nombreuses ambiguïtés et empêche les auteurs des recettes (que PGS qualifie aussi d'« approche classique ») de répondre correctement à aucune des deux questions. Pour lui :

Lorsque ces résumés deviennent plus précis et fonctionnent mieux en tant que recette ils omettent des cas. Lorsqu'ils se veulent plus inclusives ils détruisent leurs facultés de recettes. (Godfrey-Smith, 2009, p. 27)

Après avoir décrit un certain nombre de ces recettes et en montrant en quoi elles peuvent exclure certains cas d'évolution biologique pourtant évidents, PGS propose de changer d'approche et d'introduire un cadre de réflexion différent. Plutôt que de résumer l'évolution par des énoncés linguistiques qui excluent nécessairement des cas lorsqu'ils se veulent précis et perdent en puissance explicative lorsqu'ils cherchent à gagner en généralité, PGS propose d'inclure tous les cas possible en développant un schéma plus souple. Il part des descriptions classiques, les « recettes » ainsi que de la *gene eye view* (que nous avons présentée en même temps que la critique que PGS en a faite, dans la section précédente) pour en déduire des caractéristiques « minimales » qui peuvent définir une « population darwinienne ». Pour lui, « une collection de choses individuelles causalement connectées » est « *une population darwinienne au sens minimal* » lorsque au sein de cette collection il y a :

Variations de caractères qui entraînent une différence dans le résultat de la reproduction [...], et qui est héritée d'un quelconque manière.

Il décrit ces caractéristiques minimales comme un « set-up » dont les propriétés, si elles sont présentes dans une population, permettent à cette population d'évoluer selon la définition de Darwin et les recettes des biologistes contemporains.

Et la réflexion ne s'arrête pas là. De ces principes minimaux il va dériver des « populations paradigmatiques » (*ibid.* p. 41). Ce sont des populations qui possèdent ces caractéristiques minimales et qui ont intéressées les biologistes depuis le début de la biologie de l'évolution. Celle d'après lesquelles ont été construites les définitions de Darwin et les recettes classiques de la théorie. Une population d'humains peut être vue comme une population paradigmatique. Une population de bactéries évoluant pour résister à des antibiotiques aussi (*ibid.*). Pour lui cette définition des populations paradigmatiques n'impose pas de niveaux d'organisation biologique particuliers pour présenter ces propriétés et être soumis à une évolution darwinienne. De plus, il considère que cela ne doit pas exclure les populations qui ne présentent pas toutes ces caractéristiques mais qui pourtant sont clairement composées d'individus biologiques ou clairement issues et/ou soumises à une évolution d'une quelconque sorte. Ce sont des populations *marginale*ment darwiniennes.

Pour inclure ces populations marginales il construit un espace multi-dimensionnel en décomposant les caractéristiques minimales que nous avons présentées ci-dessus. Pour lui ces caractéristiques peuvent être vues comme la combinaison de 5 facteurs :

- H : Fidélité de l'hérédité,
- V : Abondance de la variation,
- α : Interaction compétitive par rapport à la reproduction,
- S : Dépendance de la reproduction différenciée à des facteurs internes.
- C : Continuité, régularité du paysage adaptatif,

« H » et « V » sont assez évidents nous ne reviendront pas dessus. En revanche il est intéressant de décrire et d'illustrer en quelques phrases les trois autres facteurs.

Avec « α » PGS veut résumer le concept écologique de la dépendance du succès reproductif des individus d'une population au succès reproductif des autres individus de cette population. C'est un facteur qui rend compte de l'interdépendance (« glueing »

en anglais dans le texte, p. 52) des individus d'une population. Dit autrement, si α est proche de 0 alors la capacité d'un individu à survivre et se reproduire n'impactera pas la fitness d'un autre individu. On peut considérer qu'ils sont isolés géographiquement, ou qu'il n'y a pas de compétition pour les ressources entre eux. En revanche lorsque α est proche de 1, ce qui est le cas dans les populations paradigmatiques, si un individu réussit mieux qu'un autre, son génotype tendra à remplacer les autres. Il n'y aura pas juste augmentation du nombre d'individus avec ce génotype mais une diminution du nombre d'individus avec d'autres génomes. Selon une interprétation plus fisherienne : la fréquence allélique va changer.

« S » est aussi un facteur assez subtil mais très intéressant. Il quantifie la dépendance de la fitness aux propriétés internes (intrinsèques) des individus de la population. Par exemple, lorsque S est proche de 0 et si on réduit les propriétés internes d'un individu à son génome, pour simplifier l'explication, la réussite d'un individu par rapport à un autre ne dépendra pas de ses caractéristiques génétiques, mais plutôt de phénomènes extérieurs (extrinsèques), se rapportant à l'environnement et à l'histoire de cet individu. L'exemple classique que donne PGS pour illustrer ce facteur (*ibid.* p. 54) est l'exemple de deux jumeaux strictement similaires *intrinsèquement*. L'un des deux jumeaux est frappé par un éclair et meurt. La fitness de celui-ci est donc bien plus faible que celle de l'autre qui survit puisque le premier n'aura aucun moyen de transmettre son génome. Hors cette différence de fitness n'est en aucun cas due à des différences intrinsèques puisque nous les avons éliminées *a priori*. L'auteur propose un second exemple (*ibid.* p. 56) : les cellules du corps. Ces cellules se reproduisent et mutent. Elles sont donc encore soumises à une certaine évolution. Pourtant aucune d'elles ne va voir sa fitness augmenter et se reproduire progressivement plus que les autres. Les cas où cela arrive sont appelés cancers et sont (encore) relativement rares. En réalité le devenir de la cellule n'est plus dicté par ses propriétés internes (toutes les cellules du corps ont le même génome), mais exclusivement par des facteurs extérieurs, à savoir le lieu et le moment où la cellule va apparaître dans l'organisme. Les cellules d'un organisme multicellulaire ont donc perdu leur propriété S. Si elles sont bien des populations darwiniennes, elles ne sont plus des populations darwiniennes *paradigmatiques* mais *marginales*.

« C » est un peu plus classique. Il correspond à la forme du paysage adaptatif de la population. Si C est élevé alors une *légère* modification du phénotype de l'individu correspondra à un *léger* changement de fitness. De plus, deux phénotypes assez similaires auront une fitness assez similaire. En revanche, si C est faible alors un léger changement phénotypique peut donner des adaptations totalement différentes.

Ces facteurs vont ensuite pouvoir servir de dimensions dans l'espace que propose par PGS. Mais avec 5 dimensions cet espace est difficile à visualiser et à manipuler. L'auteur explique alors que l'idée est d'étudier les populations en ne prenant que quelques-uns (3) des facteurs dégagés. Les autres peuvent être considérés comme fixés à certaines valeurs, les dimensions associées sont ainsi « écrasées » et pourront être étudiées dans un second temps. À titre d'exemple il va prendre les propriétés (H,S,C) et construire un premier espace. Dans cet espace PGS va pouvoir positionner les populations paradigmatiques qu'il considère occupant la zone (1,1,1) de son espace (cf. figure 2.1). En accord avec ce que nous avons pu dire sur les cellules du corps humains un peu plus haut, il positionnera ces dernières au point (1,0,1). Il va aussi caractériser d'autre zone de l'espace en considérant par exemple que les populations qui ont un S et un C faible mais un H élevé sont dans ce qu'il est convenu d'appeler un état de « dérive ».

Selon l'auteur, cette décomposition des caractéristiques des populations par les

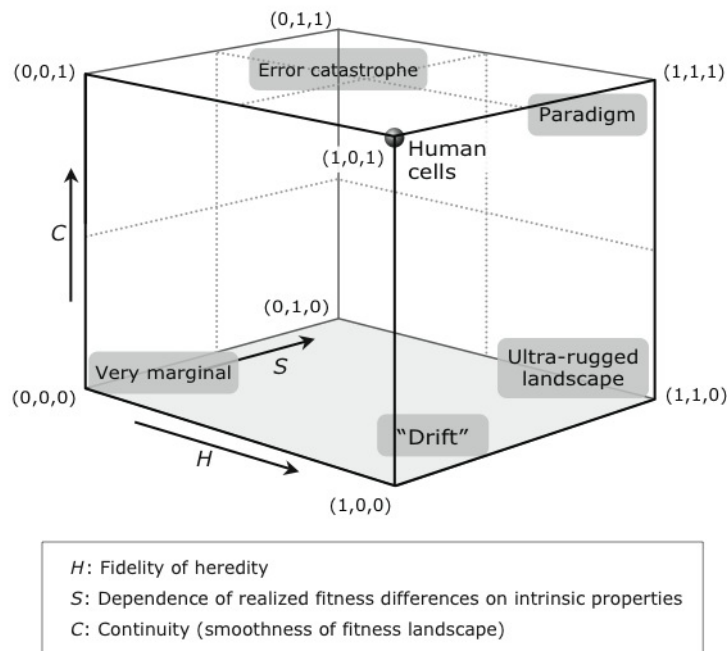


FIGURE 2.1 – L'espace tridimensionnel extrait de Godfrey-Smith (2009, p. 64)

différents facteurs qu'il propose n'est pas nécessairement la seule possible. On pourra trouver d'autre caractéristiques importantes, ou les décomposer plus finement. Les caractéristiques peuvent être différentes en fonction des besoins, on peut mettre en avant certaines, en étudier d'autre ensuite... D'ailleurs il l'illustre en réfléchissant à ce qu'il appelle les « reproducteurs collectifs » en utilisant d'autre caractéristiques qui lui permettent de mieux classer ces populations pour lesquels les facteurs précédant sont déjà plus ou moins clairs et fixés.

La vision de PGS permet donc de rendre compte du monde du vivant d'une façon assez complète.

Une [vision] dans laquelle les constituants du monde sont un large panel de populations darwiniennes : des cas paradigmatiques et des cas marginaux, certains clairs et d'autres obscurs, certains puissants et d'autre limités. Certains sont visibles et évidents, d'autre sont invisibles. Certains sont à l'intérieur d'autres. Ils avancent selon leur comportement darwinien suivant une large gamme d'échelles différentes, temporelle et spatiales. Certains évoluent via la reproduction d'un tout défini, d'autres évoluent en cooptant le matériel biologique qui en résulte [de la reproduction des premiers]. Les populations évoluent en fonction de leurs propriétés darwiniennes, mais changent aussi la base de leurs évolutions futures, en se déplaçant dans l'espace imaginaires de leurs paramètres évolutifs.

(Godfrey-Smith, 2009, p. 128)

Nous pensons que ce cadre de réflexion est l'outil idéal pour assurer le lien entre la Robotique Évolutionnaire et les recherches en Biologie car il permet de réfléchir à des cas d'évolution très différents tout en les situant sur un même continuum. Ces cas sont et donc en ne les séparant pas d'un point de vue . Nous verrons comment ce cadre offre un moyen pratique pour positionner les recherches en Robotique et les comparer avec les connaissances des systèmes biologiques, tout en offrant au chercheurs des indices sur les façon de construire leurs systèmes artificiels.

2.3 Conclusion

Dans cette partie nous avons essayer de montrer comment la théorie de l'évolution tel que l'avait imaginée Darwin était bâtie et certains problème qu'elle a pu et peu encore rencontrer. Pour arriver à cette fin nous avons rapidement retracer son histoire, en suivant le modèle de Gayon (1992) Nous avons notamment parlé des objections faites par Jenkin et comment ces objections ont amenées les biologistes à utiliser l'outil statistique pour essayer de manipuler, comprendre et illustrer la théorie de l'évolution. Pour ça nous avons présenté les travaux des biométriciens, jusqu'à ensuite décrire l'état actuel de la théorie en décrivant brièvement la vision la plus largement admise dans la communauté scientifique à laquelle a aboutie la Synthèse Moderne que nous présentons dans ses (très) grandes lignes. Puis nous avons essayé de montrer quelles pouvaient êtres aujourd'hui les questions autours de ces consensus en illustrant les problèmes ayant pu émergés et qui se sont cristallisés autour du débat sur les unités et niveaux de sélection. Sans nous prétendre exhaustifs, nous avons essayé de dégager quelques positions caractéristiques prisent autours de ce débat, puis nous avons terminé en développant le cadre de réflexion de Godfrey-Smith (2009) dans lequel nous souhaitons positionner notre objet d'étude principal à savoir : la Robotique Évolutionnaire. Avant de placer la Robotique Évolutionnaire dans ce cadre nous allons, dans la première moitié de la partie suivante, décrire quelques outils théoriques et empiriques utilisés par les chercheurs et philosophes pour réfléchir et trouver des réponses aux débats en théorie de l'évolution tel que celui présenté dans la partie 2.2.1 puis nous passerons la seconde moitié de la partie suivante à décrire en détail la Robotique Évolutionnaire, son histoire, ses différentes facettes, ses atouts et ses faiblesses.

Chapitre 3

Méthodes d'investigations : expériences, modèles et Robotique

Ce chapitre va être l'occasion de passer en revue différents outils d'investigation qu'utilisent les chercheurs pour étudier la théorie de l'évolution. Sans nécessairement prétendre être exhaustif, nous commencerons par analyser les méthodes plus « traditionnelles » que sont l'analogie, les expériences de pensées et les modèles (au sens large puis en nous concentrant sur les modèles simulés informatiquement). Nous profiterons de ce moment pour présenter la conception sémantique des théories qui nous semble être le cadre épistémologique idéal pour développer notre argument.

Nous terminerons en décrivant en détails la Robotique Évolutionnaire, en reprenant rapidement son histoire, ses principes de fonctionnement et en essayant de la positionner par rapport aux méthodes pré-existantes et au cadre de réflexion présenté.

3.1 Méthodes et outils traditionnel

3.1.1 L'analogie Sélection artificielle & Sélection Naturelle

Il est donc de la plus haute importance d'élucider quels sont les moyens de modification et de coadaptation. Tout d'abord, il m'a semblé probable que l'étude attentive des animaux domestiques et des plantes cultivées devait offrir le meilleur champ de recherches pour expliquer cet obscur problème. Je n'ai pas été désappointé ; j'ai bientôt reconnu, en effet, que nos connaissances, quelque imparfaites qu'elles soient, sur les variations à l'état domestique, nous fournissent toujours l'explication la plus simple et la moins sujette à erreur. Qu'il me soit donc permis d'ajouter que, dans ma conviction, ces études ont la plus grande importance et qu'elles sont ordinairement beaucoup trop négligées par les naturalistes.¹

C'est ainsi que dès l'introduction de son livre, Darwin place l'analogie entre sélection naturelle et sélection artificielle comme un élément central de son argumentation.

1. Darwin (1859, Introduction) D'après l'édition de 1896 (- SCHLEICHER FRERES, EDITEURS -). Traduit sur l'édition anglaise définitive par ED. BARBIER.

Cet élément il va prendre le temps de le développer en détail, notamment tout au long du premier chapitre de l'Origine des Espèces pendant lequel il va passer en revue un grand nombre d'exemple qu'il reprend de la littérature sur l'élevage qu'il connaît très bien. Chiens, pigeons, chevaux, presque toutes les espèces domestiques de l'époque y passent.

L'utilisation et la place de cette analogie dans la démarche de Darwin a été beaucoup débattue par les philosophes de la fin du XIXe siècle. Lui a-t-elle permis de comprendre la sélection naturelle, ou bien l'a-t-il simplement utilisé pour convaincre du bien fondé de son hypothèse de la Sélection Naturelle que nous avons décrite en 2.1.2 ?

Nous ne prendrons pas le temps de prendre positions sur tout les détails de ces débats mais soulignerons que, quelques soient les conclusions, la sélection Artificielle a joué un rôle important dans la compréhension de la théorie de l'évolution et ce, dès sa création.

Cette méthode a un avantage évident : elle permet d'étudier des propriétés de l'évolution directement sur les êtres vivants. C'est donc la méthode la plus proche des méthodes empiriques traditionnelles en biologie. Son inconvénient est lui aussi bien connu : comment peut-on généraliser les effets d'une sélection produite artificiellement par l'homme, sur un petit nombre d'organismes pendant un temps relativement court, à l'ensemble de la biosphère depuis sa création ?

3.1.2 Les expériences de pensée

3.1.3 Les modèles et simulations informatiques

Une façon de décrire le monde en général et la biologie en particulier, est de construire des « modèles » de ce monde. Un modèle c'est Cette vision de la science et des théories scientifiques est une vision qui a été beaucoup débattue depuis le milieu du XIXe siècle.

they all agree that models are the central unit of scientific theorizing.

(?)

De nombreuses façons de construire un modèle ont été expérimentées, mais, depuis les années 70 et la démocratisation et l'avènement de l'informatique, la modélisation par informatique tend à se répandre de plus en plus. Dans un modèle informatique le « monde » est décrit selon un algorithme que l'on pourrait ensuite « simuler » afin d'observer la concordance avec le monde réel. Cette nouvelle façon de faire de la science diffère des méthodes classiques car l'expérience, le modèle, n'est plus centré sur l'objet d'étude, mais sur un processus informatique qui tente de le mimer. Un certain nombre de chercheurs considère que ces méthodes ne sont pas tant différentes que les méthodes classiques d'expériences. On citera par exemple Winsberg qui en comparant une expérience classique en physique dans laquelle les physiciens recréent en laboratoire certaines conditions du monde physique pour tester les effets, Winsberg montre que cette dernière n'est pas plus exempte que la simulation informatiques de simplifications/raccourcis, qui pourraient s'avérer cruciaux.

Les modèles informatiques (que nous confondons ici avec les simulations informatiques, comme le fait Winsberg (2003)) ont un certain nombre d'atouts.

Des « outils » (artefacts) épistémiques généraux De plus en plus nombreux sont les philosophes qui pensent que les simulations informatiques doivent être considérées comme des expériences empiriques classiques. D'ailleurs l'idée d'Hacking qui stipule que les expériences « have a life of their own » se transpose très bien. Ainsi lors des simulations le modèle est revu et corrigé sans cesse, dans un va et vient continu

entre les outils numériques, mathématiques et les données empiriques nouvelles a despotisations. Dans ce va et viens emergent « dans les armes et le sang » comme l'image si bien Winsberg (2009) pour celui qui a déjà eu a produire de telle simulations, une nouvelle vision du monde. Qui n'est pas simplement, comme le souligne Winsberg (reprenant un tel et un tel), un intermédiaires entre les experiences et les théories, mais bien un objet a part. Cette objet permet de porter un éclairage nouveaux sur un certains parties de monde difficilement descriptibles via des equations généraux et analytiquement calculable, mais qui nécessite des moels précis, parfois complexe, qui entrent parfaitement dans le cadre de la vue sémantique des théories proposé par Van Fraassen, les problèmes liés à l'explications de l'évolution étant un exemple parfait de ces syemes dans lesquelles les interactinos sont nombreuses, difficilement prédictible, complexe, auto-organisé, non calculable, non-linéaires, etc...(cf aussi Knuuttila and Voutilainen (2002) humphrey, Winsberg 2003...)

Et en effet dans ce domaine l'utilisation de modèles, ainsi que de simulation informatiques n'est pas nouvelles. En biologie plus particulièrement, et biologie de l'évolution : Maynard Smith ? E.F Keller ? Et la vie artificielle

Les modèles computationnels et surtout les simulations informatiques ont depuis longtemps (langton 1987 ?) été utilisés pour essayer de comprendre la biologie. Si les modèles et simulations informatiques ont été utilisés pour vérifier des modèles mathématiques écologiques (Lotka Volterra, Maynard Smith...), ils ont aussi passionné tout une branche des chercheurs à cheval entre informatique et sciences du vivants. Ce domaine, vaste, flou, à la croisé 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 toujours été très proche de la robotique évolutionnaire. Mais voyons d'abords quels outils offre la VA pour comprendre la biologie.

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 pour beaucoup de chercheurs en RE et comme nous voulons le défendre, n'est plus simplement de construire (*designer*) un objet technologique avec des caractéristiques particulières (ce qui correspondrait aux caractéristiques des modèles de la catégorie 2 de Barandiaran et Moreno²) 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,
- (b) des modèles conceptuels,
- (c) des modèles fonctionnels et,
- (d) des modèles mécanistes.

2. Nous verrons dans la partie 3.2 que la RE tombe effectivement dans cette catégorie et est perçue tel qu'elle par ces acteurs. Néanmoins son rapprochement avec la Vie Artificielle n'est pas donné *a priori* et relève plus d'une volonté de la communauté : la RE aurait très bien pu se développer en modèle d'ingénierie loin des considérations de la vie artificielle.

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 évolutive.

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 clair 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. Dans ce sens les modèles de vie artificielle possèdent bien les qualités que Hacking (1992), dans la lignée de Kuhn, confère aux expériences de pensée à savoir comment nous l'avons déjà dit dans la section 3.1.2, leur capacité à illustrer et à révéler des tensions entre des théories scientifiques et des visions différentes (Hacking, 1992, p. 304). Ou, comme le résume Peck (2004) dans une revue de l'utilité des simulations en biologie et en écologie :

[The simulation] shows what the world would look like, if it really did work the way in which we think it does. Peck (2004, p. 533)

Mais dans ce cas-ci, et comme le précise Winsberg (2003) la simulation change un peu la donne. Et là où les expériences de pensée ne sont que des illustrations statiques d'après Hacking, les simulations informatiques en générale, et les simulations en vie artificielle en particulier, sont lancées, ajustées, modifiées, au regard de la théorie, des résultats des simulations et des nouvelles données expérimentales.

Dans le cas précis des modèles de vie artificielle appliqués à l'évolution Hune-man (2012) a déjà montré que l'algorithmique évolutive peut être utile à certains degrés. En insistant avec justesse sur une précaution à prendre : en biologie tout interagi avec tout (cf Eldredge), on « choisit » 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 capteurs et d'effecteurs, pour devenir à leur tour des agents « incarnés ». Dans ce que nous allons commencer à décrire et à appeler *la Robotique évolutive*.

Il est donc temps de voir en détails ce qu'est exactement la Robotique Évolutive. Comprendre comment elle fonctionne et les motivations des chercheurs pourra nous permettre de la positionner par rapport aux outils que nous avons décrit plus haut, ainsi que de voir quels avantages et inconvénients celle-ci possède.

3.2 Une nouvelle méthode, la Robotique Évolutionnaire ?

3.2.1 La Robotique Évolutionnaire

Bref Historique

Comme nous l'avons déjà décrit en introduction, la Robotique Évolutionnaire (RE, en anglais ER, *Evolutionary Robotics*) descend directement de l'Algorithmique Évolutionnaire. Le principe clef est de reprendre « l'outil », les *recettes* (comme les appelle Godfrey-Smith (2009)) de la théorie darwinienne de l'évolution revue et corrigée par les néo-darwiniens et la synthèse moderne, afin de trouver une méthode pour construire automatiquement des robots. Comme nous l'avons aussi déjà introduit, l'intuition que l'évolution selon Darwin peut s'appliquer à des machines pour leur offrir la complexité et la robustesse nécessaire à leur autonomie dans le monde réel est aussi vieille que l'informatique elle-même, le texte de Turing (1950) en est un bon exemple.

Mais bien que cette intuition était présente alors que l'informatique balbutie au stade embryonnaire, il a fallu attendre : 1. l'invention de l'Algorithmique Évolutionnaire (AE, cf. 1.1) pour démontrer le bien fondé et l'utilité de l'application de ces idées à des entités numériques ; et, 2. qu'émerge une nouvelle école de robotique aux fondements théoriques différents de la robotique classique alors en vigueur aux débuts de l'AE, pour que l'intuition de Turing trouve un terrain empirique et théorique fertile à son implémentation.

Nous avons déjà vu en introduction les principes et l'histoire de l'algorithmique évolutionnaire et avant d'en faire de même pour la Robotique Évolutionnaire (RE), prenons le temps de dire deux mots sur ce qui nous semble le second prérequis à la naissance de la RE, l'apparition d'une nouvelle école en robotique. Ce nouveau courant, dont la portée peut en fait être étendue à l'Intelligence Artificielle en général, a opéré un changement conceptuel quasi philosophique à la fin des années 80. Les roboticiens de cette période ont démontré que la voie suivie par l'Intelligence Artificielle traditionnelle de l'époque, fille du computationalisme des années 60, n'était pas la seule possible. Reprenant les travaux de Braintenberg (1986) et de certains éthologues, Brooks (1991) notamment 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, capable de s'imbriquer dans une boucle « perception-action » simple et « réactive » (la robotique issue de ces réflexions étant bien souvent appelée « Robotique Réactive »).

Ce changement de perspective paraît « plus en accord avec l'histoire évolutive des organismes » (Brooks dans la préface de Pfeifer and Bongard, 2006, p. 15). Il débarrasse ainsi l'intelligence de la complexité du computationalisme et permet 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.

Il est à noter qu'à la même époque les neurones formels, initialement introduits par McCulloch and Pitts (1943), étaient en plein développement. En particulier, au milieu des années 80, Rumelhart et al. (1986) inventaient un type particulier de réseaux de neurones formels, les perceptrons multicouches. Nous reparlerons en détail de ces

réseaux un peu plus tard dans cette partie, notons juste pour le moment que ces outils computationnels, apparus au bon moment, se sont révélés un modèle parfait pour implémenter le paradigme de Brooks, et deviendront un élément central de la robotique évolutionnaire. Leur utilisation et leur principe de fonctionnement (que nous reverrons) les rendent assez simple pour qu'ils puissent être largement utilisés tout en présentant certaines caractéristiques essentielles aux études de RE (nous verrons lesquelles plus tard).

Cette naissance de la Robotique Évolutionnaire eu lieu de façon quasi simultanée et en parallèle dans trois universités différentes au début des années 1990. Une en Angleterre (plus précisément dans la ville de Sussex), une aux États Unis à l'université de Caroline du Sud et l'autre en Suisse, à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (cf la préface de Nolfi and Floreano (2000) ou encore Harvey et al. (1997) pour une introduction plus détaillée de cette naissance du point de vu de l'école anglaise).

Dès le début l'application de ces méthodes pour étudier la biologie –application que nous voulons défendre ici, était envisagée par les fondateurs de la discipline. Ainsi Cliff et al. (1993) expliquent dans l'abstract d'un article d'époque qui passe en revue leurs premières avancées dans le domaine, que si leur objectif premier « est de développer des systèmes de contrôle sensorimoteur pour des robots mobiles, [ils veulent] aussi discuter l'applicabilité de [leur] approche à l'étude des systèmes biologiques. » (Cliff et al., 1993, p. 73). De même ils se considèrent plus proche de « la neuroethologie que des neurosciences computationnelles » (*ibid.* p. 74) qui sont la source d'inspiration première de la robotique classique.

Cette proximité avec la biologie se retrouvera tout au long de l'histoire de la Robotique Évolutionnaire. Le but avoué étant de développer des techniques automatiques pour « construire des robots autonomes intelligents et comprendre comment les animaux sont « construits » » (*ibid.*, guillemets d'origine) cela à tout de suite positionné la RE comme une discipline très proche de la Vie Artificielle qui était, à l'époque des premiers travaux de Robotique Évolutionnaire, en pleine effervescence (Langton, 1989). Ainsi, contrairement à l'algorithmique évolutionnaire qui a assez vite pris de la distance vis à vis de son inspiration biologique originelle, les buts et directions de la Robotique Évolutionnaire sont restés intimement liés à ce désir d'être à la fois un outil *inspiré par la biologie*, mais aussi *inspirant pour la biologie*. Reprenant à leur compte et selon leurs termes ce principe dont nous avons déjà soulevé la formulation par Maynard Smith (1978) en introduction qui dit que :

Il y a une similarité entre le problème d'ingénierie de créer un robot autonome fonctionnel amené à agir dans un environnement complexe et bruyant et le problème scientifique de proposer un modèle plausible des mécanismes sous-jacents la genèse du comportement adaptatif d'un animal.

(Cliff et al., 1993, p. 74)

De même pour (Nolfi and Floreano, 2000, p. 12-13), la question principale motivant la RE est de permettre de comprendre :

Quelles sont les caractéristiques clefs de l'évolution naturelle qui la rendent capable de produire l'extraordinaire variété de formes de vie hautement adaptées présentes sur la planète ? Répondre à cette question pourrait améliorer significativement à la fois notre compréhension des systèmes biologiques et notre habilité à concevoir des systèmes artificiels.

Assez vite une communauté va se former autour des groupes de Sussex, de l'USC et de l'EPFL. Cette communauté va réunir des chercheurs en Vie Artificielle, en Robo-

tique, en Éthologie, en Algorithmique Évolutionnaire ou encore en Neurosciences Cognitives. De nombreuses études vont être menées, s'appuyant sur des approches différentes, avec des ambitions différentes, mais ayant toute un ensemble de problématiques et de méthodes similaire. Puis en 2000 paraît le livre « éponyme » *Evolutionary Robotics* (Nolfi and Floreano, 2000). La publication de ce livre quelques années après la première conférence entièrement consacrée au sujet en 1998, peut être perçue comme l'auto-reconnaissance de la Robotique Évolutionnaire en tant que discipline à part entière. En publiant cet ouvrage la n'est plus simple sous composante de tel ou tel autre discipline, mais devient une discipline en tant que tel, maîtresse de ses propres buts, utilisant ses propres méthodes.

Principes

Le principe de base de la Robotique Évolutionnaire (RE) est exactement le même que celui que nous avons présenté en introduction pour décrire l'Algorithmique Évolutionnaire (AE) : appliquer les principes de l'évolution selon Darwin à des artefacts humains (plus précisément numériques dans le cas de l'AE). Parmi les différences notables (que nous avons déjà soulevées) qu'on peut noter entre AE et RE, les premières à s'imposer sont : l'objet, le but et l'environnement avec lesquels travaillent les roboticiens. Le but de ces derniers est de construire des robots qui doivent se déplacer de façon tout à fait autonome dans des environnements « réel », qu'on ne connaît pas forcément à l'avance. Ces environnements sont susceptibles de subir de nombreux changements pendant l'activité du robot, changements qui peuvent même (qu'on peut souhaiter) être produits par le robot lui-même. Les contraintes qui s'appliquent sont donc beaucoup plus proches de celles auxquelles sont soumis les êtres vivants que des solutions et des objets manipulés par l'AE.

Néanmoins une limitation technologique importante, qui diminue de beaucoup l'étendue de l'analogie possible entre RE et biologie est à noter et doit être prise en compte au plus tôt. La grande majorité des travaux, et la quasi totalité des méthodes que nous allons décrire, portent sur le développement par évolution artificielle des éléments responsables du contrôle du comportement des êtres vivants, les régulateurs de la boucle sensorimotrice « perceptions/actions » —ce qui pourrait correspondre, si l'on poursuit quand même l'analogie, au système nerveux des êtres vivants, dont la partie par l'observateur est ce qu'on pourrait appeler le *comportement* des robots. La morphologie des robots quant à elle n'est en aucun cas modifiée. Elle est fixe et imposée dès le départ par le modèle de robot choisi pour l'étude en question et ne changera pas, si ce n'est à cause de problèmes d'usure.

Hors, dans le monde du vivant, l'évolution du système nerveux est intimement liée à l'évolution de la morphologie des êtres biologiques qu'il « contrôle ». Plus encore, depuis une vingtaine d'années un grand nombre d'études et quasiment toute une école de pensée (souvent désignée par le terme de *embodied cognition* et qui est d'ailleurs elle aussi une descendante directe des changements de perspective en robotique dont nous avons parlé précédemment) tendent à montrer que cette coévolution est essentielle pour qu'émergent les fonctions cognitives « avancées » qu'on pu développer, par exemple, les hommes (Pfeifer and Bongard, 2006). Néanmoins ce découplage de l'évolution du comportement et du corps ne doit pas empêcher d'appliquer les méthodes d'évolution à l'étude de l'évolution en générale pour autant.

Premièrement, ce découplage n'a pas empêché les chercheurs du domaine de clairement le cerner comme une limite. Au contraire, nombreuses sont les études en RE et plus largement en AE appliquées à des systèmes électroniques, qui ont mises en

avant l'importance du couplage morphologie/contrôle sensorimoteur. Le rôle de ces expériences est très certainement centrale dans la prise de conscience de l'importance de ce problème chez les acteurs de la communauté qui s'accordent clairement aujourd'hui sur le fait que :

Bien sur, ce n'est pas ainsi que l'évolution naturelle agit. L'évolution ne démarre pas avec un corps donné et ensuite fait évoluer un cerveau pour ce corps ; en revanche, les deux, corps et cerveau, évoluent ensemble au cours du temps. Pour des systèmes artificiels, la capacité de faire évoluer la morphologie et le contrôle neuronal de concert est cruciale si nous voulons exploiter la totale puissance de l'évolution. (Pfeifer and Bongard, 2006, p. 193)

Ensuite, et fort de cette constatation, de nombreuses tentatives pour pallier ce problème ont été proposées. Parmi les premières et les plus connues de ces tentatives il y a les remarquables expériences de Sims (1994). Ce dernier a, avec succès, fait coévoluer morphologies et comportements dans des simulations avec des résultats aussi étonnants que convaincants³. Ces expériences ont été suivies par celles de Pollack and Lipson (2000) avec lesquelles les auteurs ont voulu donner une forme physique aux simulations de Sims, ou encore dans les travaux de (Pfeifer and Bongard, 2006, ch. 6). Cet effort est toujours à l'œuvre et reste un des objectifs centraux de la discipline (la « synthèses automatique » comme le nomment Doncieux et al. (2009)). L'idée est de laisser à l'évolution le soin de modéliser un maximum des éléments des agents à concevoir et de minimiser au maximum l'intervention de l'humain. Cette volonté est très présente dans les nombreuses tentatives de rapprochement de la RE avec les sciences du développement en biologie pour former ce que certains appellent « l'évo-devo-robo » Bredeche et al. (2011) et qui fait dire à (Nolfi and Floreano, 2000, p. 17) que « développement est une des issues les plus débattues en robotique évolutionnaire » et qu'en RE :

La direction la plus prometteuse est d'inclure dans le processus évolutionnaire d'autres mécanismes tel que la plasticité ontogénique qui pourrait augmenter la puissance adaptative du processus évolutionnaire sans accroître le rôle du concepteur humain.

En dernier point il est à noter que ce découplage n'enlève pas nécessairement la valeur que peuvent avoir certains modèles de RE. Malgré les abstractions qui doivent être faites lors des expériences de RE, si ces dernières présentent certaines caractéristiques essentielles similaires à certaines situations biologiques particulières, la simulation peut apporter des choses sur la compréhension du vivant biologique de l'expérience de robotique. De plus, ce découplage, cette distinction comportement/morphologie que semble imposer la RE est vrai si on considère que l'analogue du « corps » des individus biologiques est la structure matériel du robot et que l'individu artificiel est le couple (programme informatique, robot). Hors cette analogie, bien que peu discutée car découlant directement de la façon dont sont implémentés les algorithmes évolutionnaires en RE, n'est peut-être pas la plus adéquate. Elle le semble d'autant moins lorsqu'on considère l'important développement des méthodes de « swarm intelligence » par de nombreux chercheurs de la discipline. Dans ces études les scientifiques font évoluer des populations de robots capables de s'associer, de se spécialiser, et dans lesquels la distinction entre individus/morphologie/robots/populations n'est plus si claire.

3. Des vidéos et plus de détails sur ces expériences sont disponibles ici : <http://www.karl-sims.com/evolved-virtual-creatures.html>.

Une fois apportées ces précisions essayons de nous pencher plus en détail sur le fonctionnement des algorithmes évolutionnaires utilisés en RE.

Dans sa version la plus classique une expérience de Robotique Évolutionnaire se déroule comme suit (Nolfi and Parisi, 1996; Floreano and Mondada, 1994; Jakobi, 1997, pour certains exemples historiques de la littérature) :

D'abord (1) une tâche que le robot doit résoudre est définie (prenons par exemple la tâche de ramener un objet dans le coin précis d'une pièce repéré par une couleur particulière). Ensuite (2) un certain type de programmes informatiques, de contrôleurs autonomes qui vont s'occuper de gérer le comportement du robot, doivent être choisis. Ces contrôleurs doivent avoir certaines propriétés particulières. En premier lieu (a) ils doivent fournir aux robots les capacités (qu'on pourrait dans notre cas qualifier de « cognitives ») nécessaires à l'accomplissement de la tâche. Par exemple : si le robot doit parcourir un labyrinthe complexe dans lequel il doit trouver une sortie, alors le robot doit être capable de mémoriser les lieux qu'il visite. Le contrôleur doit pouvoir offrir et gérer cette mémoire. De plus, (b) c'est le contrôleur, le responsable du comportement du robot, qui va être soumis à l'évolution. C'est lui qui va « subir » les mécanismes nécessaires à l'évolution. Il va être répliqué, muté, croisé, etc... il faut donc que le contrôleur utilisé puisse supporter ce genre de chose. Tout comme dans le cas du voyageur que nous avons vu dans la partie 1.2 où il était possible de représenter la solution par une chaîne de caractère que l'on pouvait aisément muter, croiser, etc... le contrôleur doit présenter des propriétés similaires. C'est pourquoi une des solutions souvent adoptée par les chercheurs est, comme nous l'avons déjà rapidement sous-entendu, les réseaux de neurones artificiels (*Artificial Neural Network*, RNA en anglais). Nous reviendrons plus en détails sur ces réseaux de neurones un peu plus tard.

Ensuite (3) et une fois choisis ces contrôleurs ; une « population initiale » va être générée. C'est à dire, pour le cas d'une expérience classique menée avec des réseaux de neurones artificiels, qu'un nombre, donné *a priori*, d'individu, donc de chaînes d'entiers générés aléatoirement, va être créé.

(4) Ces contrôleurs générés aléatoirement doivent ensuite être testés sur les robots. Pour ça différentes méthodes sont possibles et nous en verrons d'autres, mais la classique et historique méthode des pionniers aux moyens limités (et qui ne possèdent donc qu'un robot) est la suivante. Chaque contrôleur est envoyé sur l'unique robot puis exécuté. Lors de l'exécution du contrôleur un certain nombre de données qui serviront à déterminer le degré de réussite du robot sont enregistrées, puis un autre contrôleur est chargé sur le robot pour être testé à son tour. Pour que la comparaison soit possible il faut évidemment que les conditions initiales soient les mêmes et ainsi, le robot doit être remis à son point de départ et toutes les conditions environnementales réinitialisées à l'identique. Ce travail de test est un travail long, fastidieux, sujet à beaucoup d'erreur et loin de trouver un équivalent dans le monde biologique. Nous verrons certaines méthodes qui contournent ce problème, notamment à travers ce que nous présenterons comme l'Évolution Embarquée (EE, cf 3.2.2).

(5) Une fois les tests de chaque contrôleur terminés une mesure de leur réussite doit être faite, pour qu'une comparaison qualitative entre les différents programmes puisse avoir lieu. C'est ce qu'il est convenu d'appeler la *fonction fitness* puisque c'est un calcul qui va nous offrir le degré d'adaptation, la fitness, du contrôleur, au regard de la tâche à accomplir. En générale un ensemble de variables (environnementales, « physiologiques ») enregistrées pendant l'expérience vont être utilisées. Par exemple, dans le cas de notre balle devant être ramenée dans un coin de labyrinthe, une bonne mesure pourrait être la distance restante entre la balle et l'objectif que l'on pourrait

pondérer par la vitesse et/ou la distance mise pour amener la balle à cette endroit. (6) en fonction des résultats, un certain nombre de contrôleurs vont être sélectionnés, via par exemple ce qu'il est convenu d'appeler la roulette proportionnée⁴. Après l'étape de sélection (7) on va muter et croiser les « solution », les « individus » pour en obtenir de nouveaux, puis les nouvelles solution constitueront une nouvelle génération et l'expérience pourra repartir en 4.

La suite d'instruction que nous venons de décrire est un algorithme évolutionnaire. Appliqué à la robotique ils sont le cœur de la RE. Évidemment ce schéma, fortement inspiré de la biologie, peut-être raffiné et complexifié à loisir. Chaque étape peut être pensée et réalisée de multiples façons. Certaines vont poser plus de problèmes que d'autres et des choix faits dépendra beaucoup le type de résultat obtenu. Nous avons parlé du choix du contrôleur, mais la façon de calculer la fitness, le type et le nombre de robots utilisés, l'utilisation de la simulation où encore la manière de croiser et muter les individus, sont autant d'autres éléments qui peuvent varier d'une étude à l'autre. La littérature abonde sur les pourquoi et comment choisir ces paramètres et nous ne pouvons que vous conseiller de voir Nolfi and Floreano (2000) pour avoir de plus amples informations sur le sujet. Dans le cadre de ce travail, après avoir décrit un peu plus en détails les contrôleurs les plus utilisés, à savoir les réseaux de neurones artificiels, nous verrons un certain nombre de ces choix méthodologiques. Notamment certains qui ont permis de dépasser des obstacles sur lesquels butait la RE et qui nous semblent beaucoup plus pertinents compte tenu du cadre dans lequel nous souhaitons utiliser la RE, à savoir l'étude de la théorie de l'évolution.

Les réseaux de neurones artificiels

Comme nous l'avons annoncé au point 2 de la description de l'algorithme évolutionnaire classiquement utilisé en RE, la plupart des chercheurs du domaine utilisent des réseaux de neurones artificiels.

Un réseau de neurones artificiel est un concept mathématique qui permet de relier des variables d'« entrée » à des variables de « sortie ». Plus explicitement, suivant une vague analogie avec la biologie, un neurone va recevoir une ou plusieurs données en entrée, qui pourront être fournies par l'environnement ou par d'autres neurones et va s'activer ou non en fonction des valeurs d'entrées et d'une fonction d'activation interne au neurone. À l'intersection entre les neurones (ou entre un neurone et un capteur) sont présentes des « synapses ». Ces synapses possèdent un poids, souvent susceptible de varier au cours de la vie d'un agent (c'est la base de l'« apprentissage »).

Sans nous attarder trop sur les détails de ces réseaux de neurones artificiels, rappelons rapidement que ceux-ci reprennent des concepts développés par (McCulloch and Pitts, 1943) et sont faits en superposant des « couches » de neurones formels (les sorties des neurones des premières couches serviront d'entrée pour les neurones des couches suivantes). En règle générale, il est fréquent d'utiliser un type particulier et bien connu de neurones formels : les perceptrons. La mise en réseaux de ces perceptrons, dans ce qu'il est convenu d'appeler par le terme technique des Perceptrons Multi-Couches (PMC, ou MLP pour *Multi-Layer Perceptron* en anglais) offre une solution aux chercheurs en RE avec plusieurs avantages qui en fait le candidat idéal des expériences évolutionnaire. Premièrement, il va être possible de relier les entrées du PMC

4. Dans la roulette proportionnée les individus sélectionnés vont l'être de sorte que plus les individus ont une fitness élevée plus ils ont de chance d'être sélectionnés. Ainsi on aura en moyenne les meilleurs individus dans les générations suivantes sans pour autant empêcher les individus les moins bons de transmettre leurs caractéristiques.

aux différents capteurs du robots (capteurs de vitesse, infra-rouge, ultra-son, caméras, thermomètres, gyroscopes, ...) ainsi que les sorties sur les « effecteurs » du robot (moteurs, émetteurs lumineux, ...). Ensuite, pour peu qu'on construise ces réseaux de façon adéquate et qu'on leur fournisse des règles pour le faire, ils vont pouvoir être soumis à un apprentissage (Nolfi and Floreano, 2000, p. 30-39). Cet apprentissage peut être mené de différentes façon. Pendant la « vie⁵ » du robot ou pendant une phase spécifique d'apprentissage. Ces méthodes offrent au robot une « mémoire » et donc la possibilité pour celui-ci de résoudre des tâches plus complexes. Pour terminer avec ce qui nous semble être les principaux atouts des réseaux de neurones artificiel, ces derniers peuvent être très simplement représentés en résumant chaque neurone par le poids de ses « synapses », la fonction d'activation et les règles d'apprentissage dont il va se servir. Ainsi, ce qui sera considéré comme notre « individu », soumis à l'évolution, sera une chaîne de nombres, codant pour des poids et des fonctions mathématiques qui seront utilisés dans un Perceptron Multi-Couches conçu pour contrôler un robot.

De façon plus exhaustive et détaillé que nous Nolfi and Floreano (2000, p. 39), listent six caractéristiques indépendamment susceptibles de justifier l'emploi des RNA.

1. Un *espace de recherche lisse* : ce qui signifie qu'un changement léger dans les paramètres du réseau de neurones aboutira à un changement léger dans le comportement du robot. Ce n'est pas exactement le paramètre C de PGS que nous avons évoqué la section 2.2.2 puisque la fitness n'entre pas directement en compte. Mais comme cette elle en est une composante certaine, d'autant plus que la fitness des robots est souvent assez directement corrélé à leur comportement. Il est intéressant de noter comme les roboticiens ont réalisé l'importance de cette condition pour que l'évolution soit possible.
2. Les réseaux de neurones permettent d'ajuster une certaine *granularité* : on peut, dans l'algorithme évolutionnaire mis en place, choisir de prendre en compte et faire évoluer uniquement les poids des neurones ou des groupes de neurones.
3. Ils peuvent montrer *différents niveaux d'adaptation* : phylogénétiques (évolution du poids des synapses au cours des générations), développementaux (maturation des connexions entre les neurones à l'initialisation des robots), ontogénique (apprentissage par renforcement ou autre avec modification des poids synaptiques au cours de la vie du robot).
4. Ils offrent un *mapping direct entre senseurs et effecteurs* : les réseaux de neurones peuvent sans problème recevoir un signal d'entrée analogique continue depuis les capteurs et délivrer un signal discret ou continu aux moteurs selon les besoins.
5. Ils sont relativement robustes au bruit. Même si les signaux délivrés par les capteurs sont bruités, comme les données sont intégrées par des fonctions d'activations qui somment de nombreuses entrées pondérées, ils sont peu sensibles aux oscillations dues au bruit d'une entrée.
6. Ils sont une métaphore biologiquement plausible des mécanismes qui supportent les comportements adaptatifs. Ils se présentent donc comme un choix naturel pour qui veut comprendre et reproduire les comportements biologiques. (Plus ou moins librement adapté de Nolfi and Floreano, 2000, p. 39 les emphases ont toutes été ajoutées)

5. Ce qu'on désigne en général par la « vie » du robot est la période pendant laquelle le robot est testé, ce qui correspondrait à l'étape 4 de l'algorithme évolutionnaire décrit avant

3.2.2 Challenges et méthodes alternatives, évolution non dirigée et « sans but »

Challenges et obstacles

Mais comme nous l'avons évoqué, certaines étapes présentent des difficultés et les expériences en Robotique Évolutionnaire font face à de nombreux obstacles. Matarić and Cliff (1996) essayaient déjà de les lister dans un article des débuts de la RE. Nous allons essayer d'en illustrer quelques un en reprenant l'exemple d'AE que nous avons esquissé dans la section 3.2.1.

D'abord, pour tester les contrôleurs générés aléatoirement (dans le cas où un unique robot est utilisé pour l'expérience), il faut : transférer un contrôleur sur le robot, démarrer le robot, enregistrer des observations, arrêter le robot et recommencer la manœuvre avec un nouveau contrôleur. De plus il faut veiller qu'à chaque nouveau test les conditions expérimentales soient strictement les mêmes. Le robot doit donc être replacer et les variables de l'environnement ré-initialisée de sorte à ce que tout soit le plus proche de leur état d'origine.

Dans les expériences traditionnelles des débuts tout était fait manuellement par l'expérimentateur. Ainsi le chercheur va prendre son robot, charger le programme à tester à l'intérieur, poser le robot à un point précis dans l'environnement de test, lancer le programme de contrôle, attendre le temps souhaité, arrêter le robot et ré-initialiser l'environnement, replacer le robot et recommencer autant de fois qu'il y a d'individus. Le tout multiplié par le nombre de générations nécessaires à l'émergence de solutions acceptables.

Hors, pour que l'évolution soit efficace et l'expérience intéressante il faut que les populations qui vont évoluer aient un maximum d'individus. Dit autrement il faut tester un grand nombre de contrôleurs sur le robot pour avoir des chances d'obtenir des résultats intéressantes. Si l'on considère l'expérience de l'arène de tout à l'heure, et que l'action de prendre le robot, le tester, l'arrêter et charger un nouveau contrôleur prend 5 minutes, qu'on teste cet expérience avec 100 individus sur 10 générations et il faut déjà 83 heures d'expériences. Puisqu'en général l'intérêt des ces expériences et d'essayer l'évolution en faisant varier différents paramètre, si le chercheurs veut tester 2 paramètres pouvant prendre trois valeurs différentes (ce qui est très peu), il faut alors 747 heures d'expériences.

Pour pallier ce problème la solution qui est souvent adoptée est d'accélérer le processus en simulant l'évolution des contrôleurs sur ordinateur. Ainsi, des simulateurs sont utilisés, qui recréent l'environnement de l'expérience et permettent de tester les contrôleurs dans des robots virtuels. Le problème lorsque la simulation est utilisée est que les solutions trouvées ne sont jamais parfaitement adaptées à l'environnement réel. Une seconde phase d'évolution est alors souvent nécessaire, pour franchir ce que les chercheurs appellent le « *reality gap* » et ajuster les contrôleurs aux contraintes physiques. Ce n'est qu'après cette étape que les solutions obtenues par simulation peuvent être utilisables sur robots réels.

Matarić and Cliff (1996) soulèvent ces deux problèmes dans leur article, à savoir : 1. la lenteur que l'évolution sur des robots réels et 2. les problèmes liés à l'utilisation des simulations . Mais ils ne s'arrêtent pas à ceux-ci et en listent d'autres. Ils notent, par exemple, les problèmes liés à l'évaluation des solutions : combien de fois doit-on évaluer un robot avant d'être sur que sa valeur de fitness soit la bonne ? Dans le même registre, ils évoquent les problèmes liées à la conception de la fonction fitness, qui est la fonction qui va donner un score à chaque individu après leur évaluation. Comment la

concevoir pour qu'elle réponde aux attentes et que l'algorithme évolutionnaire puisse trouver une solution sans que construire cette fonction soit trop complexe et que se dissolve un des intérêts des méthodes par évolution, à savoir, limiter l'intervention humaine ?

Ce problème des fonctions fitness est beaucoup discuté dans la littérature de RE et revêt pour nous un intérêt particulier. Nous allons nous arrêter dessus quelques lignes.

La question principale est de savoir comment construire un outil pour calculer le "degré de qualité" d'un robot par rapport à un objectif visé. Replacé dans le cadre de notre exemple où les robots doivent pousser des objets vers une zone, il s'agit de trouver une façon de classer les comportements de sorte que ceux qui permettent aux robots de rapprocher les objets de l'objectif soient en tête. On pourra, par exemple, prendre à la fin de l'évaluation, la distance moyenne des objets à déplacer par rapport au but et dire que plus cette distance est faible, plus les robots auront un score élevé.

Mais si l'on implémente cette contrainte tel quelle, au début de l'expérience, pendant les premières générations, un robot qui ne fait rien aura un meilleur score qu'un robot qui bouge beaucoup en déplaçant les objets et en les éloignant. Hors, il faut d'abord que certains robots soient capables de déplacer les objets (même en les éloignant), avant que la sélection ne puissent favoriser ceux qui les rapprochent du but de ceux qui ne les rapprochent pas⁶. Il faut donc trouver une astuce pour encapsuler ces étapes dans la fonction fitness.

Généralement les expérimentateurs décomposent la fonction en y rajoutant des éléments. Ils vont par exemple décider d'augmenter *aussi* le score des individus qui se déplacent beaucoup. Encore que cette ajout va engendrer d'autres problèmes. En effet, un robot qui se déplace beaucoup en faisant des tours sur lui-même aura plus de points qu'un individu qui avance par à coup en ligne droite pour atteindre son but. Là encore les chercheurs vont devoir rajouter un élément et récompenser les individus qui se déplacent beaucoup *en faisant le moins de virage possible*⁷. Et ainsi de suite, la fonction fitness pourra être affiné et décomposée en sous éléments. Mais plus le chercheur veut décomposer ce problème et plus il doit le connaître *a priori* et savoir comment le résoudre. Autant de contraintes que devaient franchir les méthodes par évolution.

En regardant de plus près ces questions de fitness et de définir des "degrés de qualité" sont des questions très proches de celles que se posent les biologistes. On pourrait traduire « construire une fonction fitness » en termes biologiques et dire que c'est « construire l'outil pour aider les populations à gravir le paysage adaptatifs dans des directions voulues ». Les degrés de qualité ne sont en réalité que le pendant technologiques des degrés d'adaptation des êtres vivants.

Ainsi comprendre comment faire évoluer des artéfacts complexes et quelle direction donner à l'évolution pour y arriver, revient à comprendre comment les phénomènes évolutifs modifient les phénotypes et génotypes des êtres vivants et comment, des ces modifications, peut émerger la complexité. Avancer dans la compréhension du premier problème permettra d'avancer dans la compréhension de l'autre et *vice-versa*. Tout comme les paysages adaptatifs de Wright ont offert un modèle graphique per-

6. L'évolution pourrait probablement prendre d'autres chemins pour faire évoluer les comportements voulus mais pour les besoins de l'exemple et pour que ce dernier reste simple nous nous limiterons à cette éventualité.

7. Cette mesure s'obtient facilement en calculant la différence de vitesse entre les deux roues : si les deux roues tournent à la même vitesse alors le robot avance droit, sinon, plus la différence est élevée, plus le robot tourne.

mettant aux biologistes de réfléchir aux dynamiques évolutives, réfléchir aux fonctions fitness que manipulent les roboticiens permet de comprendre comment il est possible de *se mouvoir sur* et de *déformer* ces paysages. La robotique évolutionnaire et ses fonctions fitness (que la RE a dérivé de ses inspirations biologiques), offrent un modèle physique pour illustrer les résultats de ces mouvements adaptatifs.

Selon nous ces questions cristallisent certains problèmes majeurs que rencontrent roboticiens *et* biologistes. Elles nous paraissent en ce sens emblématiques des points sur lesquels l'approche des uns peut apporter beaucoup à l'approche des autres, *sans qu'il n'y ai de sens privilégié à cet échange*.

Matarić and Cliff (1996) soulèvent encore d'autres problèmes, comme ceux liés à la nécessité d'encoder les comportements de sorte que les algorithmes évolutionnaires puissent les manipuler (ce que les Réseaux de Neurones Artificiels offrent en partie ; cf 3.2.1). Ils parlent aussi des problèmes liés à l'explosion combinatoire des tests à effectuer si les expérimentateurs veulent essayer de nombreux paramètres, des problèmes liés à l'usure des robots ou encore à la nécessité de recharger ces derniers en énergies (*ibid.* p. 75-81), mais nous ne reprendrons pas chacun des points soulevés.

Nous allons plutôt nous concentrer, dans la suite de cette partie, sur des approches particulières de la Robotique Évolutionnaire, qui permettent de surmonter certains obstacles cités précédemment tout en renforçant la proximité avec l'étude du vivant qui est au cœur de notre réflexion, et qui nous paraissent les modèles de choix pour étudier la biologie à travers la RE.

Évolution Embarquée

Dans un premier temps, Watson et al. (2002) ont proposé de changer l'algorithme évolutionnaire de base pour développer ce qu'ils ont appelé « l'Évolution Embarquée » (EE, *Embodied Evolution* en anglais). Dans l'article qui pose les bases de ce principe ils expliquent qu'avec cette EE ils souhaitent :

[qu'] il n'y ai plus d'interventions humaines, que ce soit pour évaluer, reproduire ou repositionner les robots pour les nouveaux tests. (Watson et al., 2002, p. 1)

Interventions avec lesquelles la RE a du mal à faire sans. Partant de ce postulat, ils définissent l'Évolution Embarquée comme :

L'évolution se déroulant au sein d'une population de robots réels dans laquelle l'évaluation, la sélection, la reproduction sont supportés par et entre les robots, d'une façon distribuée, asynchrone et autonome. (Watson et al., 2002, p. 2)

Si les auteurs proposent l'EE comme alternative c'est que cela permettrait selon eux de réaliser trois objectifs :

1. Concevoir une expérience de *vie artificielle*,
2. proposer une méthodologie en RE et
3. permettre d'effectuer des tâches collectives.

Et si ils insistent sur la volonté de rapprocher l'ER des expériences en Vie Artificielle c'est que :

Dans l'évolution naturelle les mécanismes adaptatifs sont totalement décentralisés et distribués : l'évaluation est implicite et la reproduction est menée de façon autonome par les agents de la population. (*ibid.* p. 2)

Hors ce n'est pas le cas en RE, et ainsi lui font défauts les

propriétés distribués et autonomes de l'évolution naturelle.

Ces propriétés, bon nombre d'expériences de Vie Artificielle les implémentent pour essayer de les étudier. Ces pourquoi les auteurs veulent concevoir une expérience de RE comme une expérience de Vie Artificielle. Pour eux, proposer un tel rapprochement pourrait permettre d'outrepasser certaines des limites actuelles de la RE. De plus, implémenter une évolution autonome et décentralisée devrait fournir à la RE les clefs pour qu'elle explore l'univers des tâches que l'on ne peut résoudre que collectivement, dans lesquelles des sous groupes doivent se spécialiser ou pour lesquelles de nombreuses interactions inter-agents sont nécessaires. Ceci ouvrira les portes aux recherches sur les colonies d'individus, la *swarm intelligence* (Garnier et al., 2007) et l'étude des organismes multicellulaires et de la spécialisation.

L'idée est donc de proposer une Robotique Évolutionnaire alternative dans laquelle l'évolution serait directement sur les robots, de façon totalement autonome, asynchrone et décentralisée.

Les auteurs proposent une expérience dans laquelle ils implémentent leur propre version de cette évolution embarquée. Cette expérience reprend un algorithme génétique, dans lequel les "individus" qui évoluent, sont des réseaux de neurones artificielles. Les génomes, qui vont être mutés et reproduits, sont donc des chaînes qui encodent une représentation de ces réseaux de neurones (cf. partie 3.2.1).

D'abord la fitness des individus, ou au moins une valeur qui l'approxime, doit pouvoir être mesurée directement sur les robots pour garantir l'autonomie du processus. Généralement dans une expérience traditionnelle de RE cette autonomie n'est pas respectée. C'est l'expérimentateur ou un ordinateur central qui est en charge de calculer la fitness de chaque individu. Ici, un mécanisme embarqué sur les robots, capable de s'occuper de cette mesure doit être mis en place. Ce mécanisme peut être soit implicite, auquel cas la capacité de survivre et de se reproduire du robot est directement corrélée à sa fitness (sa survie et sa reproduction dépendront directement de sa capacité à résoudre la tâche), soit explicite, dans ce cas un mécanisme embarqué sur le robot spécialement dédié à cette tâche permet de déterminer la fitness en fonction de données qui lui sont accessibles.

Dans les expériences les auteurs proposent de plus ou moins mixer les deux en implémentant un concept d'énergie. Cette énergie le robot va l'obtenir en résolvant la tâche (dans ce cas précis le robot doit se rapprocher d'une source lumineuse). Lorsque le robot a de l'énergie (signe qu'il a réussi au moins une fois la tâche), il va pouvoir se reproduire à un rythme plus élevé que lorsque il n'en a pas. Cette "énergie" (qui n'a rien à voir avec l'énergie utilisée par les robots pour actionner leurs moteurs⁸) les auteurs insistent sur le fait que ce n'est pas directement la fitness des individus. Par exemple, la performance du contrôleur présent précédemment, impacte sur la jauge d'énergie. Ainsi alors que le nouveau génome n'a peut-être pas encore eu le temps de faire ses preuves il sera peut-être même si il n'a pas permis au robot d'atteindre la lumière. C'est pourquoi, suivant la démarche des auteurs, nous continuerons de parler de l'énergie plutôt que de la fitness.

La reproduction, qui est un autre élément important de l'évolution, doit elle aussi être effectuée de façon autonome et distribuée parmi les robots. Comme il n'est pas possible de créer des nouveaux robots de toutes pièces, il faut réutiliser des robots déjà

8. Pour supprimer le problème du réapprovisionnement en énergie des robots, les auteurs ont mis en place un dispositif *spécifique* aux besoins de l'expérience. Ils ont construit une dalle électrifiée permettant au robot, via une coque métallique conçue dans cet optique, de recharger leur batterie en continue.

présents dans la population. Une solution, que décrivent les auteurs, est de, plutôt que prendre deux génomes que l'on croise pour obtenir un nouvel individu, de réécrire le génome d'un des parents en prenant des morceaux de génome du parent avec la fitness la plus élevée. Plutôt que d'avoir deux individus donnant naissance à un seul, il y'a un "transfert" de l'information d'un individu à un autre, un peu comme ce que peuvent faire les bactéries avec leurs transferts horizontaux.

Pour leur expérience les auteurs reprennent cette idée en la précisant et en la modifiant un peu : chaque robot va émettre son génome, légèrement muté, en continue. Comme nous l'avons déjà dit ce taux d'émission sera proportionnel au taux d'énergie du robot et donc à sa capacité à résoudre la tâche. Tout les robots qui seront dans le périmètre d'émission du robot émetteur pourront recevoir le génome et choisir d'autoriser le génome reçu à écraser son propre génome. Cette "autorisation" de changer le génome se fera en fonction de l'énergie du robot récepteur. Plus l'énergie du récepteur sera élevée plus faible sera la probabilité qu'un autre génome le remplace.

Cette méthode permet aux auteurs de faire évoluer des réseaux de neurones artificiels pour contrôler des robots capables de se diriger vers la lumière. Les résultats obtenus sont intéressants car 1/ ils sont plus efficaces que des contrôleurs conçus manuellement par les auteurs, 2/ ils présentent des comportements assez contre intuitifs qui exploitent très bien les contraintes physiques du monde et l'architecture matérielle des robots.

Néanmoins Watson et al. (2002) admettent que si leur but premier, qui était avant tout la curiosité de voir si un tel système pouvait fonctionner "par principe", a été atteint, la méthode, en tant que méthode d'ingénierie de Robotique Évolutionnaire reste à améliorer. Dans un premier temps les résultats ne porte que sur des tests qui sont déjà bien connus en robotique et résolubles via d'autres méthodes moins complexes à mettre en œuvre, ensuite car l'application de l'EE sur des populations de robots engendre de nouveaux problèmes liées à l'interaction de nombreux robots entre eux. Ces problèmes sont autant de nouveaux problèmes à régler qui n'existent pas dans la RE traditionnel où chaque contrôleur est testé sur un seul robot.

Néanmoins cela reste selon nous une étape importante vers un rapprochement de la RE et de la biologie. Les obstacles auxquels font allusions les auteurs sont plus technologiques que conceptuels ; et n'enlèvent rien à la valeur théorique de cette expérience et aux différentes voies de recherche qu'elle inaugure.

Évolution Dirigée par l'Environnement, « *open ended* »

Plus récemment Bredèche et al. (2011) (ainsi que de façon à peu près similaire : Trueba et al. (2011)) reprennent l'idée de Watson et al. (2002) pour proposer leur développement du concept d'Évolution Embarquée. Nous allons voir que leur approche se veut encore plus proche des phénomènes naturels (et donc de la vie artificielle) et qu'il justifie cette proximité par le besoin de concevoir :

des agents physiques autonomes [...] (ex : des robots autonomes), faisant faces à des environnements inconnus et/ou dynamiques. Cette classe de problème apparaît typiquement lorsque l'environnement demeure inconnu du concepteur humains jusqu'à ce que la population soit opérationnelle dans la situation réelle, ou lorsque l'environnement est connue pour changer pendant l'opération, sans qu'aucune indications sur le moment et la manière dont ces changements impacteront les stratégies mises au point pour survivre.
(Bredèche et al., 2011, p.1)

Selon eux, et reprenant en ce sens Watson et al. (2002), pour obtenir de tel résultats l'évolution doit se faire de façon décentralisée, entre les robots et sans aucune intervention extérieure. Ils insistent sur le fait que la fitness doit être totalement implicite. À l'instar de l'évolution naturelle, c'est de l'interaction entre les robots et leur environnement que doivent émerger les contraintes qui vont, ou non, permettre aux individus de survivre.

C'est ainsi qu'il vont suivre la voie explorée parallèlement par de nombreux chercheurs en vie artificielle : la voie de l'évolution *open-end* (??), et pousser plus loin encore la bio-inspiration. Dans le cadre originel de l'évolution *open-ended* plus question de sélectionner en attribuant une qualité aux individus observés. L'unique but est d'observer l'évolution des individus au sein de l'environnement. D'observer les réactions du système, selon les contraintes de l'environnement, les capacités des agents, sans intervenir d'aucune façon.

Cette étude de l'évolution *open-ended* est partie intégrante des grands défis des chercheurs en Vie Artificielle (?) qui font ainsi passer l'évolution du statut d'outils à celui d'objet d'étude. Le but est de trouver : (a) *ce qui est inévitable dans l'évolution de la vie*, (b) *les caractéristiques communes à tous les processus évolutionnaires*, et pour finir, ce qui nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de cette étude : (c) *trouver les conditions minimales d'évolution pour passer de systèmes répondants uniquement à des environnements simples et spécifiques, à des systèmes capables de généraliser et répondre dans de multiples environnements* (? , voir respectivement les chapitres 3.6, 3.10 et 3.7).

Maîtriser ces systèmes *open-ended* permettrait de bénéficier des avantages des techniques évolutionnaires classiques (auto-adaptation et design automatique) tout en s'affranchissant de la nécessité de connaître *a priori* les comportements recherchés.

Ce qui nous intéresse plus particulièrement dans cette étude est de savoir comment ces systèmes d'évolution *open-ended* se comportent lorsqu'ils doivent permettre la spécialisation des populations qui évoluent en leur sein ? Quelles caractéristiques doivent posséder de tels systèmes pour que cette spécialisation ait lieu ? Cet algorithme, appelé mEDEA (pour minimal Environment-Driven Distributed Evolutionary Adaptation) et décrit par Bredèche et al. (2011) reprend à la lettre la métaphore du gène égoïste de Dawkins (1976) : chaque génome est perçu comme l'entité évolutive de base, qui utilise les robots comme «outils» pour se multiplier et se transmettre dans la population et à travers les générations.

Cet algorithme tourne en continue, parallèlement à une fonction de communication dont le but est de recevoir et stocker les génomes dans une Liste de Génomes Importés.

À chaque itération de la simulation, le comportement d'un agent donné est déterminé par une architecture de contrôle dont les paramètres sont stockés dans un génome actif, qui restera le même toute la durée d'une génération. Ce génome est émis en continue par la fonction de communication dans le rayon d'émission (limitée) du robot.

De fait l'algorithme implémente un certain nombre de caractéristiques simples mais néanmoins importantes de la structure traditionnelle des algorithmes évolutionnaires :

Un opérateur de sélection : c'est ici une simple sélection aléatoire d'un génome parmi la liste des génomes importés. Il n'y a aucune pression de sélection au *niveau local de l'individu*. Du point de vue de ce dernier, la sélection se fait totalement aléatoirement. Aucune entité centrale et aucune connaissance quelconque n'est nécessaire pour sélectionner le génome qui sera utilisé à la prochaine génération. La pression à la sélection n'est perceptible qu'à *un niveau global, de la population* : plus un génome est distribué à un grand nombre d'individus, plus il se propage dans la population, plus il a

de chance d'être sélectionné aléatoirement à la génération suivante *en moyenne* dans l'ensemble de la population. De fait, plus larges sont les populations et les chances de croisements (au sens de rencontre et non génétique) entre les individus, plus précise et plus juste est la pression de sélection au niveau de la population.

Un opérateur de variation (mutation) : qui est assumé comme conservateur dans notre cas, afin d'assurer une continuité tout au long de la course évolutionnaire. Générer des copies modifiées d'un génome ne fait sens que si il existe une continuité dans la généalogie de ce génome : si il n'y a pas de variation l'algorithme finira par converger en moyenne vers la solution la plus efficace au sein de la population initiale. Dans les expériences que nous décrirons ensuite, nous opterons pour un opérateur aléatoire gaussien, inspiré par les Stratégies Évolutionnaires ?, avec laquelle l'ampleur des mutations locales peut être ajusté simplement à l'aide d'un paramètre σ .

Un opérateur de remplacement : en dernier lieu s'exécute un opérateur de remplacement, qui va décider de la «mort», de la disparition des génomes remplacés. Ce remplacement se fait par (1) une délétion du génome actif, et (2), une sélection d'un génome au hasard dans la liste des génomes. Au niveau de la population, cela implique que les génomes survivants à une génération G ont de fortes chances d'être corrélés avec des stratégies efficaces pour favoriser les rencontres du fait qu'un génome donné ne peut survivre qu'à travers des copies légèrement différentes de lui même transmises à d'autres robots tout au long de l'expérience.

Par sa définition, l'opérateur de remplacement fait que si, à la fin d'une génération, un robot n'a pu recevoir de génomes (ou dit autrement, si un génome n'a pas été en mesure de contrôler un robot pour lui permettre de recevoir d'autres génomes) et que sa liste de génomes importés est vide, le robot ne sera plus en mesure de se déplacer. Il est ainsi mis en mode «pause», et ne fait qu'«écouter».

3.2.3 Qu'apporte-t-elle ?

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 grande 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 expérience de sélection artificielle, d'observer physiquement l'évolution des comportements tout en gardant la possibilité d'accélérer.

Chapitre 4

Double réflexion sur la notion d'individu

4.1 L'individu en Biologie

—— quelques lignes à récupérer : ——

4.2 l'individu en Robotique Évolutionnaire

La notion d'individu en Robotique Évolutionnaire est assez simple, voir naïve. Elle découle directement des *recettes* évolutionnaire, qu'on tenté de construire les biologiste à la fin de la synthèse moderne.

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 essaient d'étudier l'impact 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 ne 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 ?.

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 pourra non seulement résoudre certains problèmes, 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 5

Conclusion

Bibliographie

- Barandiaran, X. E., Di Paolo, E., and Rohde, M. (2009). Defining Agency : Individuality, Normativity, Asymmetry, and Spatio-temporality in Action. *Adaptive Behavior*, 17(5) :367–386.
- 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).
- Beatty, J. (1980). What’s Wrong with the Received View of Evolutionary Theory ? *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1980 :pp. 397–426.
- Bouchard, F. (2009). Understanding colonial traits using symbiosis research and ecosystem ecology. *Biological Theory*, 4(3) :240–246.
- Bouchard, F. (2011). Darwinism without populations : A more inclusive understanding of the “survival of the fittest”. *Studies in History and Philosophy of Science Part C*, 42(1) :106–114.
- Braitenberg, V. (1986). *Vehicles : Experiments in Synthetic Psychology*. MIT Press.
- Bredecche, 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.
- Bredèche, N., Montanier, J.-M., Wenguo, L., and Alan FT, W. (2011). Environment-driven Distributed Evolutionary Adaptation in a Population of Autonomous Robotic Agents. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*.
- 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.
- Cliff, D., Husbands, P., and Harvey, I. (1993). Explorations in evolutionary robotics. *Adapt. Behav.*, 2(1) :73–110.
- 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.

- Darwin, C. (1868). *The Variation of animals and plants under domestication*. John Murray, London.
- Darwin, C. (1871). *The Descent of Man*. D. Appleton and Co.
- Dawkins, R. (1976). *The Selfish Gene*. Oxford University Press.
- Dennett, D. C. (1995). *Darwin's dangerous idea : evolution and the meanings of life*. Simon & Schuster, New York :.
- Doncieux, S., Mouret, J.-B., and Bredeche, N. (2009). Exploring New Horizons in Evolutionary Design of Robots. In *Workshop on Exploring new horizons in Evolutionary Design of Robots at IROS 2009*, pages 5–12, Saint Louis, United States.
- Eiben, A. and Smith, J. (2003). *Introduction to Evolutionary Computing*. Natural Computing Series. Springer.
- Fisher, R. (1918). The correlation between relatives on the supposition of mendelian inheritance. *Trans. Roy. Soc. Edinb.*, 52 :399–433.
- Fisher, R. (1930). *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford : Clarendon Press.
- Floreano, D. and Mondada, F. (1994). Automatic creation of an autonomous agent : genetic evolution of a neural-network driven robot. In *Proceedings of the third international conference on Simulation of adaptive behavior : from animals to animats 3 : from animals to animats 3*, SAB94, pages 421–430, Cambridge, MA, USA. MIT Press.
- Garnier, S., Gautrais, J., and Theraulaz, G. (2007). The biological principles of swarm intelligence. *Swarm Intelligence*, 1(1) :3–31. 10.1007/s11721-007-0004-y.
- Gayon, J. (1992). *Darwin et l'après-Darwin : Une histoire de l'hypothèse de sélection naturelle*. Edition Kimé.
- Godfrey-Smith, P. (2009). *Darwinian Populations and Natural Selection*. Oxford University Press.
- Gould, S. J. (2002). *The Structure of Evolutionary Theory*. Harvard University Press.
- Griesemer, J. R. (2000). *Reproduction and the reduction of genetics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Griesemer, J. R. (2002). What is “Epi” about Epigenetics ?, pages 97 – 110. *Annals of the New York Academy of Sciences* 981.
- Hacking, I. (1992). Do Thought Experiments Have a Life of Their Own ? Comments on James Brown, Nancy Nersessian and David Gooding. *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1992 :pp. 302–308.
- 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.
- Hull, D. (1974). *Philosophy of biological science*. Prentice-Hall foundations of philosophy series. Prentice-Hall.
- 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.
- Huxley, J. (1942). *Evolution, the modern synthesis*. Science editions. Science Editions.
- Jakobi, N. (1997). Evolutionary Robotics and the Radical Envelope-of-Noise Hypothesis. *Adaptive Behavior*, 6(2) :325–368.
- 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.
- Lewontin, R. C. (1970). The Units of Selection. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1 :pp. 1–18.
- Lloyd, E. (2012). Units and levels of selection. In Zalta, E. N., editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Spring 2012 edition.
- Matarić, M. and Cliff, D. (1996). Challenges in evolving controllers for physical robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 19(1) :67–83.
- Maynard Smith, J. (1978). Optimization Theory in Evolution. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 9 :31–56.
- Maynard Smith, J. (2000). The concept of information in biology. *Philosophy of Science*, 67(2) :177–194.
- McCulloch, W. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biology*, 5(4) :115–133–133.
- 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).
- Okasha, S. (2006). *Evolution and the Levels of Selection*. Oxford scholarship online. Clarendon Press.

- 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.
- Peck, S. L. (2004). Simulation as experiment : a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(10) :530–534.
- Pfeifer, R. and Bongard, J. C. (2006). *How the Body Shapes the Way We Think : A New View of Intelligence*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Pollack, J. B. and Lipson, H. (2000). The golem project : Evolving hardware bodies and brains. In *2nd NASA / DoD Workshop on Evolvable Hardware (EH 2000), 13-15 July 2000, Palo Alto, CA, USA*, pages 37–42. IEEE Computer Society.
- 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.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986). Parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition, vol. 1. chapter Learning internal representations by error propagation, pages 318–362. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Schoenauer, M. (2009). Les Algorithmes Évolutionnaires. In Thomas Heams, P. H. G. L. and eds. Marc Silberstein, editors, *Les mondes darwiniens, L'évolution de l'évolution*, pages 731–746. Editions Syllepse.
- Sims, K. (1994). Evolving 3d morphology and behavior by competition. In *Proceedings of Artificial Life IV*, pages 28–39. MIT Press.
- Trueba, P., Prieto, A., Caamaño, P., Bellas, F., and Duro, R. (2011). Task-Driven Species in Evolutionary Robotic Teams. *Foundations on Natural and Artificial Computation*, pages 138–147.
- 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.
- Watson, R. A., Ficici, S. G., and Pollack, J. B. (2002). Embodied Evolution : Distributing an evolutionary algorithm in a population of robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 39(1) :1–18.
- Weldon, W. F. R. (1892). Certain Correlated Variations in *Crangon vulgaris*. *Royal Society of London Proceedings Series I*, 51 :1–21.

- Williams, G. C. (1966). *Adaptation and Natural Selection : A Critique of Some Current Evolutionary Thought*. Princeton Science Library. Princeton University Press.
- Wilson, D. S. and Sober, E. (1989). Reviving the superorganism. *Journal of Theoretical Biology*, 136 :337–356.
- Wimsatt, W. C. (1980). The units of selection and the structure of the multi-level genome. *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1980 :122–183.
- Winsberg, E. (2003). Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World. *Philosophy of Science*, 70(1) :105–125.
- Winsberg, E. (2009). A Tale of Two Methods. *Synthese*, 169(3) :575–592.
- Wright, S. (1932). The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution. *Proc.Int.Cong.Gen.*, 1 :356–366.