

SUR L'APPLICATION DU MODÈLE DARWINIEN À LA MODÉLISATION ENVIRONNEMENTALE

Christian Mullon, ERMES, ORSTOM, Orléans

Jean Pierre Treuil, LIA, ORSTOM, Bondy

Introduction

Nous voudrions dans cet exposé, par une présentation de certains travaux originaux sur la dynamique du processus Darwinien, introduire une discussion sur leur application à la modélisation environnementale. Les travaux en question nous semblent en effet devoir inspirer les modèles écologiques basés sur la simulation de comportements individuels (modélisations "individus-centrés") intégrant tout à la fois une composante écologique, éthologique et génétique, mais nous pensons qu'ils ont des également des implications épistémologiques plus profondes. Ils relèvent des algorithmes génétiques, branche particulièrement active de la recherche informatique actuelle. Ce sont ceux de P. Shuster sur la persistance de l'homogénéité biologique, de Hinton et Nowlan sur l'impact de la capacité à apprendre sur la dynamique de l'évolution, de Axelrod sur l'émergence de comportements coopératifs, de I. Harvey et D. Cliff sur la dynamique d'algorithmes génétiques à génotypes de longueur variables, de Werner et Dyer sur l'émergence d'une communication

Nous voudrions à partir de ces exemples essayer de montrer l'importance du principe d'énaction qui se dégage actuellement en sciences cognitives pour la question de la représentation que se fait une société de son environnement.

Processus Darwinien

Par processus Darwinien, nous entendons l'ensemble des mécanismes de l'évolution biologique, telle que les représente la synthèse dite néo-Darwinienne : sélection naturelle, reproduction sans transmission des caractères acquis, éventuellement différenciation sexuelle, dynamique de l'évolution due à la variabilité naturelle. Un des intérêts, mais peut-être la difficulté épistémologique, de ce processus est qu'il formalisable à un niveau peu courant en biologie. Dans la première moitié de ce siècle, Hardy, Fisher⁰, Haldane, Malécot, Wright ont produit la théorie statistique de la dynamique de l'évolution et des liens entre variabilité et évolution. Plus récemment Eigen, Shuster, Sigmund, Hofbauer¹ ont développé la théorie mathématique de la dynamique de la réplication. Enfin, de nos jours, les algorithmes génétiques² proposent une formalisation informatique très générale du processus Darwinien, intégrant en leur fondement le principe de la variabilité comme moteur de l'évolution. Cette formalisation, dont le champ d'application déborde largement de la problématique biologique, se révèle particulièrement adaptée à la représentation de la dynamique de système complexes. Ils représentent aujourd'hui une alternative prometteuse à la modélisation de ceux-ci par la théorie mathématique des systèmes dynamiques (équations différentielles, équations aux dérivées partielles).

Algorithmes génétiques

Mettre en oeuvre un algorithme génétique (voir D. E. Goldberg³ pour un ouvrage de référence et S. Forrest⁴ pour un article introductif) consiste

- à considérer des individus qui sont dotés d'un génotype, c'est-à-dire une séquence codée, se comportent en fonction d'un phénotype, en fait une fonction du génotype; ce qui leur confère en particulier une durée de vie et une habilité de reproduction (fitness)
- et à faire vivre la population qu'ils constituent.

On applique ce principe à des situations très variées en spécifiant différemment:

- ♦ le mode de codage qui définit le génotype
- ♦ la fonction phénotype
- ♦ les opérations de reproduction sexuée ou non (opérateurs de mutation et de croisement)



Supposons que l'on cherche à minimiser une fonction de plusieurs variables $F(X1, X2, X3)$ au comportement très irrégulier, avec une multitude de minima locaux. On considère alors une population constituée de solutions possibles dont le génotype est obtenu en concaténant les codes binaires de $X1, X2, X3$. L'idée est alors qu'à partir d'un ensemble suffisamment divers de solutions initiales, les mécanismes de reproduction, mutation et sélection, convenablement mis en oeuvre de façon à maintenir un niveau correct de diversité, vont permettre une convergence vers une bonne solution.

Supposons que l'on cherche à minimiser la durée de la tournée d'un voyageur de commerce ayant une série de villes à visiter. On considère une population de tournées possibles dont le génotype est constitué de la liste ordonnée des numéros des villes à visiter. Dans ce cas, on définit spécialement les opérateurs de mutation et de croisement de façon à ce qu'ils produisent toujours des tournées cohérentes (toutes les villes visitées une seule fois). Le problème du voyageur de commerce est d'un très haut niveau de complexité algorithmique. Les algorithmes génétiques en fournissent une solution facile à mettre en oeuvre et de bonne efficacité.

Expériences

Les principes sous-jacents des algorithmes génétiques ne sont pas mis en oeuvre uniquement pour la recherche de solutions de problèmes complexes. Ils servent également à l'étude de la dynamique de l'évolution biologique, des comportements sociaux et des processus cognitifs d'apprentissage et d'adaptation. A titre indicatif de la profonde synergie qui se manifeste entre ces différents domaines d'application des algorithmes génétiques, nous voudrions évoquer un certain nombre de travaux qui nous apparaissent significatifs dans la problématique de la modélisation environnementale.

Evolution et apprentissage

Depuis les débuts de la théorie de l'évolution, la question de l'apprentissage est discutée avec plus ou moins de sérénité. Le consensus Darwinien s'établit sur le dogme Weismanien de la non transmission des caractères acquis (appris). Il y a une trentaine d'années, J. M. Baldwin a suggéré un mécanisme un peu plus complexe d'interaction entre apprentissage et évolution basé sur l'idée que la capacité à apprendre pouvait faire partie du gène et constituait un caractère transmissible. En 1987, G. Hinton et S. J. Nowlan⁵ ont réalisé une simulation de l'effet Baldwin, dans laquelle évolue une population constituée de réseaux neuronaux chargés d'une tâche d'apprentissage et dont l'état initial, transmis par leurs parents, comporte tout à la fois des éléments définis codant l'adaptation au milieu et des éléments indéfinis, à acquérir par fonctionnement du réseau, dont les positions représentent la capacité à apprendre. Ces simulations confirment l'existence de l'effet Baldwin, c'est-à-dire, d'une rétroaction positive des capacités d'apprentissage sur l'évolution ne transgressant pas le principe de la non hérédité des caractères acquis.

Question : Comment peut-on introduire des relations fines entre apprentissage et évolution dans des recherches sur les processus d'adaptation à l'environnement?

Comportements coopératifs

Il y a quelques années, R. Axelrod⁶ a posé à la communauté scientifique le problème dit du "prisonnier itéré": sachant que deux joueurs peuvent décider soit d'aider l'autre, soit de le combattre et que le gain est maximum pour un joueur qui, ayant choisi d'être agressif, rencontre un joueur coopératif (dilemme du prisonnier), y-a-t-il, à l'occasion d'un tournoi comportant un grand nombre de parties (itérations), une stratégie basée sur les résultats des rencontres passées qui soit meilleure que les autres. Un grand nombre de chercheurs en sciences du comportement et en biologie proposèrent des stratégies élaborées qu'Axelrod opposa les unes aux autres. C'est une stratégie très simple dite "donnant-donnant" qui l'emporta dans presque tous les cas possibles. Cette stratégie consiste à coopérer la première fois, puis à chaque partie à choisir l'option de son adversaire lors de la partie précédente. Il n'est pas très difficile de coder une stratégie qui donne une option en fonction des résultats des parties précédentes. L'algorithme génétique⁷ construit avec un tel codage et dans lequel la fitness est associée aux performances converge naturellement vers la stratégie "donnant-donnant".

Question : Comment intégrer le savoir abstrait sur les comportements coopératifs, sur leur apparition, sur leur maintien dans des recherches sur le développement durable, notamment sur le sujet de la responsabilité envers les générations futures?

Emergence d'une communication

La théorie de l'évolution doit rendre compte de l'apparition des phénomènes sociaux. Les simulations mises en oeuvre par Werner et Dyer⁸ montrent comment un processus darwinien peut faire émerger ce processus social par excellence qu'est la communication. Ces simulations mettent en oeuvre une population différenciée sexuellement. Les femelles sont immobiles, perçoivent la position des mâles situés à leur proximité et émettent des signaux. Les mâles perçoivent les sons émis par les femelles proches, et se déplacent. Chaque individu porte un génotype dont une partie code pour une fonction d'émission d'un signal et l'autre pour une fonction de réaction directionnelle aux signaux, la partie du génotype qui s'exprime étant celle correspondant au sexe de l'individu. Au début du processus évolutif, aucune coordination n'existe entre les signaux et les déplacements, et les rencontres reproductives sont le fait du hasard. Au bout de plusieurs milliers de générations, les comportements se sont homogénéisés et une coordination s'est installée, assurant une économie des déplacements au regard de l'objectif de reproduction. Cette coordination est perceptible et même mesurable par un observateur extérieur, qui l'interprétera comme une communication opérationnelle entre femelles et mâles, les premières guidant les seconds. Certes cette émergence d'une coordination par communication est le résultat nécessaire de la structuration génotype/phénotype donnée au départ..

Question : Comment intégrer dans des travaux de modélisation environnementale des résultats de ce type sur les processus sociaux impliquant à la fois homogénéisation et coordination?

Robotique évolutive et algorithmes génétiques à génotypes de longueur variables

Les premiers cybernéticiens ont construit des robots selon le modèle qu'ils se faisaient du fonctionnement cérébral, avec des organes identifiés de perception, d'analyse, de réflexion et de motricité à chacun desquels correspondent des couches logiques et électroniques. En 1987, R. Brooks⁹ lança un programme pour le développement de robots dans lequel les différentes couches ne sont pas associées à des fonctions cognitives prédéfinies. Il s'agit du programme pour une intelligence sans représentation. L'adaptation au milieu correspond à l'amélioration des couches et est obtenue selon un processus de rétro-action des réponses de l'environnement sur les structures des couches. R. Brooks obtient ainsi des résultats particulièrement significatifs en matière de production de robots adaptés à des environnements variables. Depuis 1992, P. Husbands, I. Harvey et D. Cliff conduisent un programme systématique de création de robots selon ce principe et dans lequel le processus d'apprentissage est néo-Darwinien. L'un des intérêts de leur expérience réside dans la forme du génotype et des opérations de croisement et de mutation: les gènes sont de longueur variable, ce qui permet une complexité grandissante du robot. Ils caractérisent alors les types d'épreuves (les relations à l'environnement et leur succession dans le temps) qui assurent une évolution rapide et efficace (complexité minima), sur leur succession et leur rythme. L'efficacité évolutive est plus grande lorsque les robots subissent des épreuves d'abord simples, puis de plus en plus complexes.

Question : Comment intégrer une dimension temporelle, peut-être structurante comme dans les expériences ci-dessus, de la relation à l'environnement dans des travaux de modélisation environnementale?

Persistance de l'homogénéité biologique

En construisant une société dans laquelle les individus sont dotés d'un génotype G de longueur N et sont soit d'un type sauvage $G_s = (00000000)$ avec une fitness élevée, soit d'un type mutant $G \neq (00000000)$, P. Shuster a mis en évidence l'existence d'un seuil dans les taux de mutation à partir duquel le type sauvage perd sa dominance, malgré sa fitness plus élevée. En outre, ils ont montré comment relier ce seuil à la longueur du génotype. Cette relation abstraite entre taille du code et maintien de l'homogénéité donne lieu à ce que S. Kauffman appelle la "catastrophe de la complexité".

Question : Comment tenir compte de la relation entre taille du code et maintien de l'homogénéité à l'occasion de recherches sur la dynamique de la diversité biologique?

Le principe d'énaction

L'un des principes cognitifs sous-jacents à tous ces travaux est celui d'énaction. Selon ce principe, un phénomène cognitif est indissociable de l'environnement dans lequel il se produit et la médiation corporelle est inévitable. Il est donc recommandé de simuler des processus incarnés ("*put a brain in a body*") avec une attention particulière aux phénomènes d'inscription corporelle de l'esprit (Varela) c'est à dire considérer la pensée en acte (d'où le nom d'énaction). Un système cognitif se présente comme un ensemble de réseaux interconnectés capables de subir des changements structuraux. Pour qu'un tel principe puisse être mis en application, il est nécessaire de considérer un système énéacté dans la durée, et d'examiner l'émergence de couplages structurels. En fait de lui associer un fonctionnement évolutif, en l'occurrence un processus Darwinien. Selon F. Varela¹⁰ le principe d'énaction vise à "*englober la temporalité de la vie, qu'il s'agisse d'une espèce (évolution), d'un individu (ontogenèse) ou d'une structure sociale (culture)*". Nous citerons l'exemple donné par J. P. Changeux¹¹ d'un Darwinisme des connexions cérébrales efficaces pour l'explication des processus d'adaptations mentales. Le principe d'énaction donne lieu au programme de la Vie Artificielle Radicale¹² qui vise à explorer les conséquences de l'hypothèse selon laquelle un agent ne perçoit de son environnement que ce qui apparaît être une conséquence de ses propres actions.

Question : Comment le principe d'énaction permet-il de reprendre l'idée de l'environnement comme construction sociale tel que le définissent A. Pavé et M. Jollivet¹³. Comment relier le programme de la Vie Artificielle Radicale à l'idée de la recherche-action, et à sa mise en application dans les recherches sur l'environnement? Ce principe ne permet-il pas de reprendre la question de la catégorisation des objets du milieu naturel? Est-ce que la recherche sur les processus réglant l'évolution des classements du milieu naturel n'est pas aussi importante que l'étude de leur contenu et de leur structuration?

Conclusion

Loin d'être des abstractions inutiles, il nous apparaît que les principes sous-jacents aux simulations de processus Darwinien peuvent à notre avis trouver leur sens dans des travaux de modélisation de l'environnement. Les exemples présentés plus haut n'ont pas pour seul but de donner une idée de la diversité d'un champ de recherche actif. Par leur côté formel, par leurs résultats, nous pensons qu'ils permettent de reprendre des problématiques anciennes sous un jour nouveau. Il nous apparaît en particulier que la question des rythmes de l'évolution¹⁴, celle des unités de sélection¹⁵ particulièrement discutées en biologie de l'évolution peuvent être transposées avec profit dans le domaine de l'évolution culturelle¹⁶ des relations avec l'environnement

Bibliographie

⁰ Fisher, R. (1930) *The genetical theory of natural selection*, Clarendon Press, Oxford

¹ Hofbauer J., Sigmund K. (1988) *The theory of evolution and dynamical systems*, Cambridge University Press, Cambridge

² Holland, J (1975) *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor

³ Goldberg D. E. (1989) *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley

⁴ Forrest S. (1993) Genetic Algorithms: principles of natural selection applied to computation, *Science*, 261, pp 872-878

⁵ Hinton, G. E., Nowlan S. J. (1987) How learning can guide evolution, *Complex systems*, 1, 495-502

⁶ Axelrod, R. (1984) *Donnant donnant,, Une théorie de comportement coopératif*. Editions Odile Jacob, Paris 1992.

-
- ⁷ Axelrod, R. (1987) The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma. In *Genetic algorithms and simulated annealing* (L. Davis, ed), Morgan Kaufmann
- ⁸ Werner G. M., Dyer M. G. (1992) Evolution of Communication in Artificial Organisms. In (Christopher Langton, C. Taylor, J. Doyne Farmer, S. Rasmussen eds) *Artificial Life II*, Addison Wesley
- ⁹ Brooks, R: Intelligence without representation
- ¹⁰ Varela, F (1988) *Connaître les sciences cognitives*, Seuil, Paris
- ¹¹ Changeux, J.-P. (1983) *L'homme neuronal*, Fayard, Paris
- ¹² Risan, L (1995) Objectivism and Zen in the science of artificial, à paraître dans *Hovedfagsstudentenes Arbok, Socialantropologi*
- ¹³ Pavé, A., Jollivet M. (1993) L'environnement: un champ de recherche en formation, *Natures, Sciences, Sociétés*, 1, pp 6-20
- ¹⁴ Gould, S. J. *Le sourire du flamand rose , réflexion sur l'histoire naturelle*, Editions du seuil Paris 1998
- ¹⁵ Dawkins R. *Le Gène égoïste*, Armand Colin, Paris, 1990.
- ¹⁶ Durham W. H. *Coevolution. Genes, culture and Human Diversity*. Stanford University Press Stanford 1991

Tendances nouvelles

**EN MODÉLISATION
POUR L'ENVIRONNEMENT**

cité des Sciences et de l'Industrie, Paris
les 15, 16 et 17 janvier 1996

**ACTES DES JOURNÉES DU PROGRAMME
ENVIRONNEMENT, VIE ET SOCIÉTÉS**

COMMUNICATIONS ORALES

SESSION A : Problèmes de modélisation,
conceptualisation, agrégations d'échelles,
assimilation de données.



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE