UNE MODÉLISATION INTÉGRANT DES COMPOSANTES CULTURELLES DE L'INTERACTION NATURE-SOCIÉTÉ

GÉRARD WEISBUCH ET GUILLEMETTE DUCHATEAU-NGUYEN

Au moment où la modélisation fait une entrée remarquée dans l'analyse du comportement des acteurs sociaux utilisateurs de ressources naturelles¹, ce texte illustre l'une des voies possibles à explorer tout en présentant un cas d'école particulièrement propice au débat interdisciplinaire.

52

La communauté des scientifiques s'intéressant à l'environnement admet volontiers aujourd'hui que la compréhension des interactions entre l'homme et son environnement passe par la description des systèmes naturels et économiques, ainsi que par celle des règles sociales et politiques contrôlant l'exploitation des ressources naturelles². De plus en plus, les études de terrains prennent en compte les facteurs culturels dans la description des interactions entre les compartiments physico-chimiques, biologiques ou économiques d'un écosystème particulier³. En revanche, dans le cas des problèmes plus globaux, réchauffement global, biodiversité, gestion des ressources naturelles, les facteurs sociologiques ou politiques apparaissent comme des paramètres exogènes : on considère souvent que la tâche du scientifique est de décrire les systèmes naturels, éventuellement modifiés par l'impact de l'homme, et qu'il revient au politique de doser cet impact en fonction des informations fournies par les scientifiques,

mais aussi en fonction de l'opinion publique et des choix de société⁴.

En ce qui concerne la modélisation, les mêmes appréhensions vis-à-vis de la prise en compte du caractère dynamique des choix sociaux se manifestent aussi. Ces réticences s'expliquent non seulement par la crainte d'aborder le terrain politique, mais aussi par les difficultés propres à la modélisation du comportement humain. Mais depuis le béhaviorisme et ses boîtes noires, la modélisation en sciences cognitives a fait des progrès⁵ et le but de cet article est de décrire des applications de techniques récentes des sciences cognitives à des problèmes d'environnement.

En fait, les premiers modèles pluridisciplinaires ont concerné l'exploitation des ressources renouvelables. Dans le cas de l'halieutique, l'approche classique consiste à représenter la dynamique de la ressource (poisson) par une équation logistique⁶. La variable économique est le plus souvent l'effort de pêche et l'halieute se préoccupe de déterminer les conditions d'exploitation assurant par exemple un revenu stable maximal pour la pêche. L'halieutique traditionnelle couple donc les niveaux environnement et économie de la figure 1, par des approches statiques⁷ (recherche d'un optimum), dynamiques (systèmes d'équations différentielles) ou de type contrôle⁶ (choix d'un paramètre optimisant une fonction objectif sur une période donnée). Dans l'optique contrôle par exemple, la connaissance du milieu naturel est supposée parfaite,

et surtout les objectifs sont supposés donnés par l'autorité publique.

Or, en se reportant une fois de plus à la figure 1, on voit que les objectifs des agents de même que leur compréhension de leur environnement :

- conditionnent les variables du niveau économique, donc l'exploitation des ressources environnementales ;

- mais sont eux-mêmes conditionnés par l'état de l'environnement. On peut penser par exemple que les agents prennent plus en considération l'environnement dans leurs calculs économiques lorsque celui-ci commence à s'appauvrir et à se dégrader et qu'il en est de même de leurs efforts scientifiques pour le comprendre.

À partir de ce constat deux types de choix sont possibles pour le modélisateur :

- soit supposer que les variations des fonctions objectifs des agents sont lentes par rapport à celles de l'environnement et continuer à les traiter comme des paramètres fixes du modèle ;

- soit, dans une optique à plus long terme, prendre en compte les couplages culture-environnement représentés sur la figure 1 et considérer les quantités entrant dans la définition des fonctions objectifs comme des variables dont la dynamique est couplée à celle du système bio-économique.

Cette optique correspond bien aux problèmes posés par un développement durable : en caricaturant la situation, la politique économique actuelle de maximisation des pro-

Figure 1 : Schéma des trois niveaux, environnement-économie-représentations internes des agents, intervenant dans les interactions société-environnement avec des exemples de variables et de couplages pouvant intervenir dans un problème donné. Le niveau "économie" contrôle l'intensité de l'impact de l'homme sur le milieu, c'est pourquoi nous y faisons figurer des variables comme le capital investi dans l'activité économique, la population des producteurs ou la nature des technologies utilisées. Mais ce niveau "économie" est lui-même contrôlé par un niveau "culturel" : les agents décident de leurs activités et de leurs investissements en fonction de leur vision du monde. Le modèle décrit par la figure 2 est une implémentation particulière de ce schéma.

fits sans tenir compte des externalités conduirait à l'épuisement des ressources naturelles ou à des catastrophes climatiques ou écologiques. Ces scénarios apparaissent comme inévitables à moins que des changements de mentalité⁸ et par conséquent de politique économique infléchissent considérablement les trajectoires actuelles.

Notre équipe a déjà travaillé sur des modèles couplant les trois niveaux de la figure 1 et le but de cet article est de :

- montrer la faisabilité de ce type d'étude ;
- en dégager quelques principes directeurs ;

à partir de quelques exemples tirés de travaux exposés et argumentés *in extenso* dans des revues spécialisées⁹.

Nous discuterons ici un modèle (Weisbuch et Duchateau-Nguyen, 1995), dans lequel des pêcheurs décident de leurs investissements productifs et de leurs consommations futures en fonction de la manière dont ils se représentent leur environnement (figure 3). L'encadré donne une description sommaire des algorithmes utilisés, mais l'idée en est très simple : les agents¹⁰ souhaitent optimiser une consommation intégrée sur le futur avec un certain taux d'escompte¹¹. Pour ce faire, ils effec-

1. Comme en témoigne tout particulièrement le colloque « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » du CNRS des 15, 16 et 17 janvier 1996 à Paris et dont ce texte constitue une forme d'avant-première.

2. Barbault R. (1994). *Des baleines, des bactéries et des hommes*, Paris, Odile Jacob. Weber J. (1992) *Environnement, Développement et propriété*. Paris, J. Prades.

3. Voir par exemple : Bousquet F., Cambier C., Mullon C., Morand P. et Quensière J. (1993). Simulating the interaction between a society and a renewable resource, *Journal of Biological Systems*, 1(2), 199-214. Quensière, J. (1993). De la modélisation halieutique à la gestion systémique des pêches, *Natures, Sciences, Sociétés*, 1(3), 211-220.

4. Mormont M. et Dasnoy C. (1995). Expertise scientifique et action publique : le cas du changement climatique dans trois pays européens, *Natures, Sciences, Sociétés*, 3(1), 16-25.

5. Voir par exemple les manuels suivants : Hertz J., Krogh A. et Palmer R. (1991), *Introduction to the theory of neural computation*, Addison Wesley. Nadal J.-P. (1993), *Réseaux de neurones : de la physique à la psychologie*, Paris, Armand Colin.

6. Le manuel suivant est « la » référence pour s'initier à l'approche mathématique de la gestion des pêcheries : Clark C. W. (1990). *Mathematical bioeconomics*, New York, Wiley Interscience Publication. (2nd ed.).

7. Gordon H.S. (1954). The economic theory of a common property resource : the fishery, *Journal of political economy*, 62, 124-142. Schaeffer M.B. (1954). Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries, *Bull. of the Inter-American. Tropical. tuna Commission*, 1, 25-56.

tuent des prévisions sur les pêches futures en extrapolant les productions et les investissements correspondants du présent et du passé. Ils apprennent à prédire en comparant productions prédites et productions réelles. Nos agents possèdent donc une représentation du monde, les paramètres de la fonction production prédite, et un critère de choix, la consommation escomptée prédite en fonction des investissements futurs. Le modèle que nous utilisons appartient à une large classe de modèles de systèmes complexes adaptatifs¹² dans lesquels la réponse de l'agent aux événements extérieurs dépend d'une représentation du monde susceptible d'évoluer par apprentissage ou sélection en fonction de l'histoire de l'agent. Avant de donner deux résultats obtenus avec ce modèle de pêche, nous pouvons déjà discuter la problématique de ce type de recherches.

Nous souhaitons prendre en compte les trois niveaux de la figure 1, mais notre information sur chacun de ces niveaux est très incomplète. De plus, même si nous connaissons parfaitement chacun des niveaux, et que nous en "entrons" dans l'ordinateur une description complète, la masse inorganisée des résultats d'une simulation n'augmenterait guère notre compréhension du système réel. Le but d'une recherche comme la nôtre n'est pas de comparer un modèle théorique à une réalité bien cadrée. Notre approche est très différente de celle de l'économétrie par exemple, où l'on ajuste les paramètres d'un modèle minimal à un ensemble de statistiques correspondant à une situation particulière afin de prévoir l'évolution à court terme du système. Il s'agit plutôt de comprendre le rôle des mécanismes d'interaction entre les différentes composantes d'un système dans la détermination des caractères les plus évidents de la dynamique. Nous voulons par exemple savoir dans quelles conditions le système bio-économique évolue vers un épuisement des ressources ou au contraire vers le maintien d'un revenu stable et comparable au revenu optimum (connu par le modélisateur qui a construit le modèle mathématique). Par conséquent à chaque étape de la

Figure 2 : Diagramme des processus intervenant dans un modèle simplifié de pêche. (voir la définition des termes dans le texte de l'encadré).

construction du modèle, on choisit la représentation la plus simple du niveau considéré. Dans notre cas, nous avons choisi une équation logistique pour la dynamique de la ressource, une fonction de Cobb-Douglas¹³ pour décrire la production de la pêche et un réseau de prédicteurs linéaires comme représentation interne des agents. Il eut été possible lors de l'écriture du programme décrivant le système d'utiliser des modèles plus élaborés pour chacun des niveaux, mais la complexité du modèle et le grand nombre des paramètres auraient nui à la compréhension des résultats.

Dans le même ordre d'idées, nous ne supposons pas connus les paramètres du modèle : qu'il s'agisse du niveau du stock de poissons et de leur taux de renouvellement ou encore de la vitesse d'apprentissage et des coefficients d'escompte du futur des agents, ces paramètres sont soit mal connus, soit susceptibles de changer très notablement d'une situation à une autre. Par conséquent il

convient pour le modélisateur de les faire varier d'une simulation à l'autre et d'observer leur influence sur les comportements dynamiques observés. Le corollaire de cette attitude est l'absolue nécessité d'une analyse dimensionnelle¹⁴ préalable à toute étude systématique du rôle des paramètres : le nombre de simulations nécessaires variant exponentiellement avec le nombre des paramètres, l'analyse dimensionnelle permet par des changements de variables appropriés de réduire ce nombre et donc le volume des simulations. De plus l'analyse dimensionnelle améliore notre compréhension du système : il est important de savoir que tel paramètre ne change que l'échelle des variables alors que tel autre peut entraîner des changements d'ordre qualitatif de la dynamique. Cette étape familière aux mécaniciens semble parfois méconnue des informaticiens utilisant les méthodes multi-agents.

Venons-en maintenant à la discussion de quelques résultats de la simulation.

MODÈLE DE PÊCHERIE

Les variables physiques, niveau de la ressource N et capital investi dans la pêche K , sont décrites par des équations différentielles dont les termes sont représentés par les flèches en traits pleins de la figure 2. La ressource est renouvelée avec un taux r ($1-N/M$) et le capital déprécié avec un taux μ . M est la « capacité limite » du milieu. Ressource et capital investi déterminent le niveau de production P , dont une fraction f est affectée à la consommation C , et le reste réinvesti en fonction des préférences des agents et de leur représentation de l'environnement. Cette représentation est implémentée par un réseau de neurones apprenant en fonction des données P , K , f du passé (les flèches en traits pointillés représentent les transferts d'information). Le réseau « prédit » une consommation future P_e à partir du passé immédiat (6 pas de temps par exemple) et choisit la fraction f à consommer immédiatement de manière à optimiser les consommations futures.

Les équations du modèle sont donc :

$$N(t+1) = N(t) + r \left(1 - \frac{N(t)}{M} \right) N(t) - a_n \sqrt{K(t)L} N(t) \quad (1)$$

$$K(t+1) = K(t) + (1 - f(t)) P_k - \mu K(t) \quad (2)$$

avec $P_k = a_k \sqrt{K(t)L} N(t)$. a_n et a_k sont respectivement des coefficients de production en masse et en unité monétaire.

La production future est estimée par les agents suivant l'expression :

$$P_e(t+1) = \sum_{i=0}^{n_2} X_{3i} P(t-i) + X_{3i+1} K(t-i) + X_{3i+2} f(t-i) \quad (3)$$

où le vecteur X est le vecteur des prédicteurs linéaires. X est appris par l'agent qui le calcule en comparant les productions prédites aux productions réelles antérieures : divers algorithmes de calcul sont possibles, soit la résolution de n équations en X^{15} de type (3) écrites aux temps $t, t-1, \dots, t-n+1$, soit des techniques d'apprentissage par minimisation d'une fonction d'erreur entre productions estimées et réalisées⁵. Les agents peuvent donc estimer les productions et consommations futures en fonction des investissements réalisés et choisir ainsi le programme d'investissement $f(t)$ maximisant une fonction :

$$C_{\text{futur}} = \sum_{i=0}^{n_2} f(t+i) P(t+i) e^{-i\alpha} \quad (4)$$

où α est un taux d'escompte de l'avenir.

Il n'est donc pas très difficile d'implémenter par un programme informatique le modèle ci-dessus et de tracer l'évolution des différentes variables au cours du temps. En revanche caractériser l'évolution des représentations internes des agents, c'est-à-dire dans ce formalisme le vecteur X qui possède 18 composantes (valeurs prises par les variables K , P et f pendant 6 pas de temps) n'est pas *a priori* évident¹⁶. En nous fondant sur des techniques statistiques utilisées dans le cas des réseaux de neurones formels⁵, nous définissons une nouvelle variable, le recouvrement $Q(t)$ donné par :

$$Q(t) = \frac{X(t) \cdot X(t-1)}{\|X(t)\|} \quad (5)$$

où le point représente le produit scalaire des deux vecteurs.

Si la représentation est stable, $Q(t)$ est égal à 1, mais il s'en écarte notablement lors des crises « culturelles » durant lesquelles la représentation « bascule ».

L'analyse dimensionnelle du système formé des équations (1) et (2) lorsque $f(t)$ est maintenu constant montre qu'il n'existe que deux paramètres indépendants, les autres fixant les échelles de temps, de ressource et de capital. En plus de ces deux paramètres, nous devons prendre en compte lorsque $f(t)$ dépend effectivement du temps, les échelles de temps d'échantillonnage et d'apprentissage par rapport au temps propre de la dynamique du système bio-économique ainsi que le taux d'escompte du futur.

La figure 3 est tout à fait caractéristique des comportements dynamiques que l'on peut observer pour une grande gamme de paramètres. Après une courte période d'adaptation, les agents sont la plupart du temps de

bons prédicteurs ainsi qu'en témoigne la proximité des productions prédites et effectives. La consommation moyennée des agents est proche de la consommation maximale soutenable : si ce niveau de consommation

8. Ces changements sont nécessaires, mais pas forcément suffisants ; l'un des buts d'une simulation peut être de déterminer dans quelles conditions le développement est durable.

9. Weisbuch G., Gutowitz H. et Duchateau-Nguyen G. (1995). Information contagion and the economics of pollution, À paraître dans *Journal of Economic Behavior and Organization*.
Weisbuch G. et Duchateau-Nguyen G. (1995). Bounded rationality, learning and the bioeconomics of fisheries, Soumis à *Journal of Economic Behavior and Organization*.

10. Les phrases qui suivent décrivent un algorithme en termes un peu plus clairs que les simples formules mathématiques. Nous ne prétendons certes pas que de véritables agents du monde économique raisonnent ainsi ! Ce qui est impliqué dans cette formulation est que des agents économiques réagiraient aux conditions de l'environnement d'une manière semblable à celle obtenue par l'algorithme utilisé dans la mesure où ils disposeraient de la même information. Ceci ne veut pas dire que leur raisonnement calquerait l'algorithme !

11. C'est-à-dire qu'ils souhaitent obtenir une somme pondérée des consommations futures la plus grande possible, avec une pondération décroissante suivant l'éloignement dans le temps.

12. Le terme de systèmes complexes adaptatifs réfère à des systèmes réels, organismes vivants, systèmes cognitifs, systèmes immunitaires, sociétés, économies, dont on essaie de modéliser les comportements collectifs en fonction de règles d'interaction très simplifiées entre leurs constituants. Les modèles de systèmes cognitifs par réseaux de neurones formels en sont un exemple. Voir par exemple les ouvrages cités dans la note 5 et Langton C.G. (1992). *Artificial Life*, Addison Wesley.

13. Une fonction de Cobb-Douglas s'écrit : $P = K^\alpha L^\beta N^\gamma$, où P est la production, K le capital investi, L le nombre des agents et N la ressource exploitée. Nous utiliserons plus loin $\alpha = \beta = 1/2$ et $\gamma = 1$, ce qui correspond à une capture proportionnelle à la ressource et à un effort de pêche avec parfaite substitution entre capital et travail (voir par exemple⁶).

56

Figure 3 : Évolution des variables bio-économiques et "cognitives" du modèle de pêche schématisé sur la figure 2. Les résultats de simulation, production, production prédite, et consommation sont tracés en fonction du temps. La dynamique ainsi observée est intermittente, c'est-à-dire que des phases de stabilité relative (oscillations de petite amplitude) sont séparées par des crises. La variable recouvrement ($Q(t)$ de l'équation 5) est la ressemblance entre deux représentations consécutives d'un agent: elle vaut 1 en cas d'égalité des représentations, ce qui est le cas entre les crises.

est maintenu, la ressource biologique n'est pas mise en péril. Mais la dynamique est de caractère intermittent¹⁷, c'est-à-dire que de brèves crises (de l'ordre de 20 pas de temps) séparent des périodes plus calmes tous les 70 pas de temps. Ces crises périodiques s'expliquent par la méthode de prédiction des agents qui prédisent l'avenir à partir de 70 observations passées (dans cette simulation particulière) ; étant bons prédicteurs, leur trajectoire les maintient au voisinage de l'optimum. Mais dans la mesure où leurs souvenirs ne s'étendent pas au-delà de 70 pas de temps, au bout de ce temps passé près de l'optimum leur capacité prédictive s'amoindrit. L'information dont ils disposent s'est réduite : pour construire un modèle, rien ne sert de prendre 70 mesures toutes identiques. Les agents deviennent donc de mauvais prédicteurs et par conséquent la trajectoire des variables bio-économiques s'éloigne de l'optimum. Ayant de ce fait plus d'infor-

mation, les agents redeviennent de bons prédicteurs... jusqu'à ce qu'il oublie la crise. La dynamique intermittente avec de bonnes performances des agents n'est observée que pour une certaine plage de paramètres : le rapport temps d'échantillonnage des observations des agents par rapport au temps propre de la dynamique bio-économique par exemple doit être notablement inférieur à 1.

La question de la robustesse des propriétés dynamiques observées se pose : autrement dit si on ajoute maintenant au système simplifié des traits plus réalistes, les propriétés caractéristiques observées sur le système simplifié, telles que l'aptitude des agents à choisir un bon taux de ré-investissement et la dynamique intermittente, sont-elles toujours présentes ? On peut par exemple considérer la dynamique du système bio-économique réduite aux équations (1) et (2) comme trop simple et trop déterministe. Les agents représentés par un

modèle de prédicteurs linéaires décrit par l'équation (3) survivraient-ils dans un monde où les ressources peuvent fluctuer de manière aléatoire d'une année sur l'autre, ou bien même s'écrouler brusquement à cause des conditions climatiques ou de la pollution ? Nous avons abordé cette question simplement en étudiant l'influence d'un bruit aléatoire sur la ressource ou d'une chute brutale de la capacité limite du milieu, sur les conditions dans lesquelles les agents restaient de bons prédicteurs et de bons consommateurs. (Ce n'est pas toujours le cas, c'est ainsi que dans certaines conditions, les agents peuvent très bien prédire avec une excellente précision une production et une consommation faibles par rapport à l'optimum et s'y maintenir avec une remarquable persévérance !). Ces études sur l'influence du bruit et des discontinuités abruptes dans l'environnement montrent que chacune des deux méthodes d'apprentissage des prédicteurs essayée (voir encadré) a des avantages et des inconvénients. En fait l'une s'interprète¹⁸ assez naturellement en termes d'ajustement aux circonstances et l'autre en termes culturels et les agents les plus performants seraient ceux capables de choisir la méthode la plus appropriée à la conjoncture.

CONCLUSIONS

Nous voyons donc que l'utilisation de formalismes bien connus en sciences cognitives permet de modéliser simplement le rôle des processus d'apprentissage et des représentations internes des agents. Malgré la simplicité caricaturale de la structure des modèles utilisés, leur simulation nous apporte des informations nouvelles. Les résultats obtenus sont interprétables simplement alors que nous n'étions pas en mesure de les prévoir *a priori* : par exemple, nous nous attendions à observer suivant les paramètres des cas où les agents sont de bons prédicteurs et de bons investisseurs et pour d'autres paramètres des comportements inadaptés, plutôt que l'intermittence observée dans les simulations¹⁹. Nous avons insisté dans cette présentation sur les objec-

tifs de ce type de modèle du long terme : il ne s'agit pas de faire "coller" un modèle à la réalité en ajustant des paramètres, mais de comprendre comment les interactions entre les éléments d'un système fixent son comportement dynamique. La variété des comportements observables suivant les domaines²⁰ de paramètres est une caractéristique des systèmes complexes adaptatifs, et pour nous l'établissement de cette relation paramètres/comportement représente l'un des enjeux majeurs des études théoriques sur le développement viable. ■

14. L'analyse dimensionnelle est une technique mathématique simple et puissante permettant de tirer parti au maximum des données liées aux dimensions physiques d'un problème. Une excellente introduction à ses principes figure dans le second chapitre du livre de D'Arcy Thompson W. (1971). *On growth and form*, Cambridge University Press (réédition).

15. Press W., Teukolsky S. Vetterling W. et Flannery B., (1992), *Numerical recipes*, Cambridge University Press.

16. Dans les modèles de systèmes complexes adaptatifs, les représentations internes des agents sont des vecteurs ou des séquences de bits de grande dimension dont l'interprétation pose toujours problème. Pour situer ce problème, considérez ce qu'apporte la connaissance complète du génome d'un organisme à la compréhension de ses propriétés phénotypiques.

17. La notion d'intermittence a un sens précis en théorie des systèmes dynamiques. On pourra consulter : Bergé P., Pomeau Y. et Vidal C. (1984). *L'ordre dans le chaos*, Hermann.

18. Cette interprétation vient du fait que l'apprentissage à partir d'une fonction d'erreur est très sensible aux aléas de la conjoncture, alors que la méthode directe de résolution des 70 équations intègre tout le passé de l'agent et que le « savoir » ainsi acquis peut se transmettre d'un agent à l'autre.

19. D'une manière plus générale, nous avons souvent été surpris par le degré d'inhomogénéité temporelle ou spatio-temporelle des solutions obtenues lors de simulations des systèmes analogues. Nous avons par exemple simulé le couplage entre choix économiques individuels et la pollution que ces derniers engendrent (le premier article cité dans la note 9). Nous avons obtenu dans ce cas des patterns spatiaux où alternent pollueurs et non-pollueurs au lieu de répartitions homogènes.

20. L'espace des paramètres est souvent de grande dimension, même après réduction par l'analyse dimensionnelle. Le "sport favori" du modélisateur consiste à délimiter dans cet espace des sous-ensembles, les domaines. A chaque domaine est associé un comportement dynamique qualitatif, par exemple épuisement des ressources, épuisement du capital, stabilité complète des variables, cycles limites etc. L'appartenance des paramètres choisis pour une simulation à l'un des domaines garantit alors l'observation du comportement dynamique caractéristique du domaine.