



MINISTÈRE  
DE  
LA  
RECHERCHE

Environnement et développement : quelles questions pour la recherche en Sciences  
Humaines et Sociales ?

*Session : Systèmes de représentation et méthodes : en sciences humaines et sociales et en  
sciences exactes*

La modélisation en biologie et en sciences sociales : croisements  
créatifs

Alain Pavé

Colloque du Ministère de la recherche,  
Ministère de la Recherche, Paris, Amphithéâtre Henri Poincaré  
21 mars 2002

# ENVIRONNEMENT ET DEVELOPPEMENT : QUELLES QUESTIONS POUR LA RECHERCHE EN SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES ?

**Session « systèmes de représentation et méthodes : en sciences humaines et sociales et en sciences exactes »**

## **La modélisation en biologie et en sciences sociales : croisements créatifs**

Alain Pavé

Laboratoire de Biométrie et de Biologie Évolutive, UMR 5558 CNRS-UCBL, Lyon1.

### **Introduction**

L'expression mathématique des lois physiques est sans doute la concrétisation principale et la plus spectaculaire de ce qu'on appelle aujourd'hui modélisation. Cependant, au cours de l'histoire sont apparues sporadiquement des tentatives de formalisation dans d'autres domaines. Ainsi bien avant Copernic, Kepler et Galilée on trouve, dès le début du XIII<sup>ème</sup> siècle, ce qui est sans doute la première modélisation démographique avec, comme nous allons le voir, les travaux de Léonard de Pise, dit Fibonnacci. Et ce sont sans doute les modèles démographiques qui constituent les convergences les plus évidentes et les plus anciennes entre modélisation en biologie et modélisation en sciences sociales. Somme toute, l'homme est d'abord un organisme biologique, il se reproduit, il meurt comme tout autre être vivant.

Mais en regardant d'un peu plus près et sans vouloir être exhaustif, plusieurs autres domaines peuvent être cités :

- les modèles de la statistique et de l'analyse des données sont communs à beaucoup de disciplines des sciences de la vie et des sciences de l'homme et de la société, et ont été largement développés, en synergie, pour leurs besoins (dans le ouvrage correspondant on trouve fréquemment des illustrations issues de deux secteurs) ;
- les modèles économiques et ceux de la dynamique des populations, avec même une tentative d'expression de modèles communs avec la création de la « bioéconomie » dans les années 1950 ; On pourrait aussi retenir les modèles de la biométrie et de l'économétrie.
- les modèles de populations et de sociétés animales étendus à la représentation de dynamique sociales (systèmes multi-agents, développés fin des années 1980 et depuis) ;
- les modèles de la théorie des langages (Türing, Kleene, Chomsky) et leur équivalence avec des classes d'automates ont servi de support à l'élaboration de toute une théorie permettant de modéliser l'architecture des plantes (Systèmes de Lindemayer ou L-systèmes) ;
- Enfin, et pour mémoire, on se souviendra des processus de Markov, élaborés pour rendre compte de structures textuelles (successions des voyelles et des consonnes dans le poème « Eugène Onéguine » de Pouchkine, et qui ont été largement utilisés et génétique des populations.

Beaucoup d'autres exemples pourraient être cités (géographie, biogéographie et écologie, sciences de la cognition et éthologie, théorie des jeux et écologie, etc.).

De façon schématique, on pourrait dire que des classes de modèles ont été développés simultanément, utilisés sur des données et questions spécifiques des deux secteurs. On trouve souvent des références croisées dans la littérature. C'est le cas de la démographie, des modèles de comportements individuels ou sociaux, des modèles de la statistique et de l'analyse des données. En ce sens, on peut parler de croisements créatifs. Et puis, il y a des tentatives de « couplages » de modèles ou d'élaboration de nouveaux modèles intégrant problématiques biologiques et problématiques sociales. L'exemple le plus marquant est celui de la bioéconomie.

Bien que consacré aux sciences sociales, on pourra sans difficulté trouver d'autres convergences et analogies avec les modèles des sciences du vivant dans le numéro hors série de Pour la Science de juillet 1999.

Ici, on ne reviendra que sur quatre cas : la démographie, la bioéconomie et pour finir, bien que plus brièvement, sur la théorie des langages et la modélisation multi-agents.

### La démographie

Comme nous l'avons dit en introduction, le premier modèle que l'on peut recenser est celui de Léonard de Pise, dit Fibonacci, publié dans son « *liber abaci* » en 1228. En effet, c'est en raisonnant sur la croissance d'une population de lapins (dans une île pour n'avoir pas à tenir compte des migrations) qu'il a établi la suite récurrente qui porte son nom. Ce modèle est très « actuel » dans la mesure où il prend en compte les classes d'âges. Il a fallu attendre 1942, avec Leslie pour qu'un modèle plus général de ce type ait été établi.

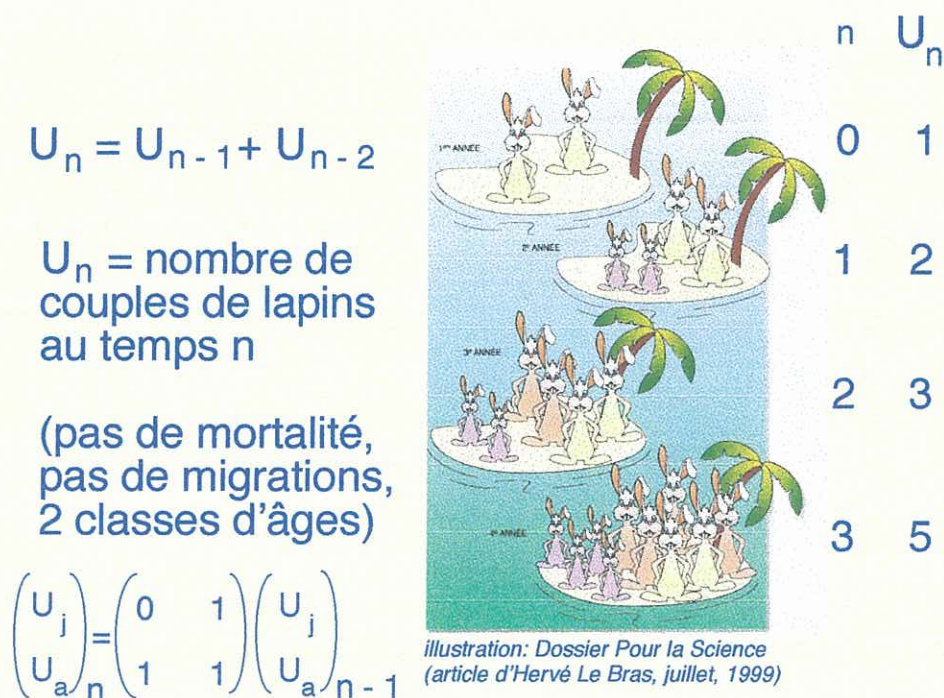


Figure 1- Le modèle de Fibonacci (1228) de la dynamique des populations de lapins.

Il a fallu ensuite attendre la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, pour que Malthus énonce le modèle exponentiel des population, 1792-1798. Les biologistes ne se le sont appropriés que plus tard, lirette leurs expériences leur ont permis d'avoir des résultats fiables et reproductibles. Il est encore largement utilisé, notamment pour décrire la phase dite précisément exponentielle de la croissance de populations bactériennes.

Ensuite, il faut retenir le nom de P.F. Verhulst qui élaborera le célèbre modèle logistique. Son article était intitulé : « *Recherche mathématique sur la loi d'accroissement de la population* ». Établi au départ sur la base de données de démographie humaine, il a été est encore très largement utilisé en écologie. Redécouvert dans les années 1920 par Pearl, il a fallu batailler pour faire reconnaître la primauté de la « découverte » à Verhulst, auteur francophone.

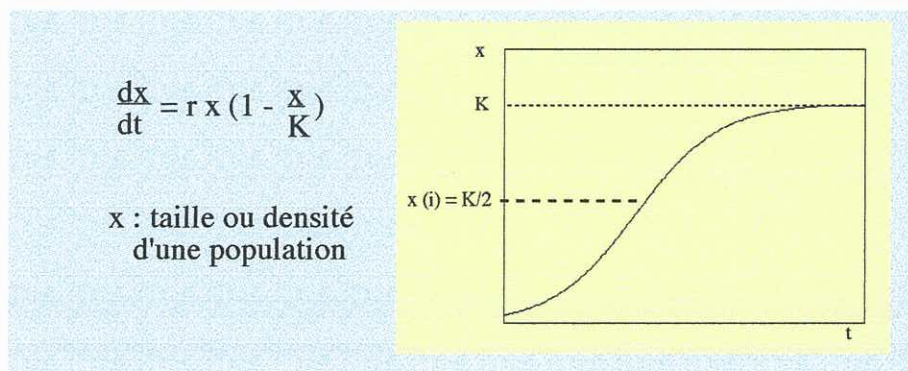


Figure 2 – Le modèle logistique de la croissance d'une population (P.F. Verhulst, 1844)

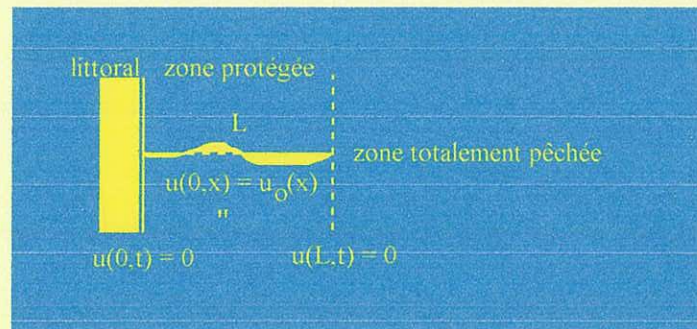
Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle on pourrait citer d'autres références, par exemple Galton et Watson et les processus de ramification et au XX<sup>e</sup>, le modèle matriciel en classe d'âge de Leslie dont on peut montrer que l'expression la plus simple (deux classes d'âges) peut se ramener à une suite de Fibonacci et qu'il est le modèle de l'espérance mathématique des processus de ramifications multidimensionnels (dits aussi multiples). Conçu pour représenter la démographie de populations animales, ce modèle a été ensuite étendu aux populations d'arbres forestiers de peuplements monospécifiques (Usher, 1966, 1969).

Les modèles de populations spatialisés sont encore peu nombreux. Parmi les plus connus, citons le modèle de Fisher, repris par Ludwig (Ludwig, 1976) pour représenter la dynamique des populations halieutique (figure 3). Ce modèle a été utilisé pour déterminer la zone dite d'économie exclusive (ZEE) des 200 mille nautiques au large des côtes.

Si les modèles de dynamique d'une population (humaine, animale, végétale) ont été largement partagés et souvent élaborés de concert entre sciences sociales et sciences de la vie, en revanche les extraordinaires développements de l'écologie théorique, lors des années 1930, ont eu peu de retentissements en démographie humaine (modèles de dynamique des populations avec interactions entre populations d'espèces différentes : compétition, prédation, symbiose, etc.).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + r u (1-u)$$

$u$  : variable d'état proportionnelle à la taille de la population exploitée



**Figure 3** – Modèle de base pour la détermination de la taille d'une zone « protégée » sur une bande littorale, c'est-à-dire où la pêche est réglementée. Hors de cette zone (au large) l'accès est libre. On se place alors dans le pire des cas : la ressource est totalement prélevée. C'est un modèle voisin qui a conduit à proposer la notion ZEE (zone d'économie exclusive) de 200 milles nautiques. Mais le modèle était-il un alibi ?

Enfin, ces modèles ne prennent pas en compte explicitement les ressources consommées par les populations pour assurer leur croissance et leur maintien. On retiendra cependant que J. Monod en a tenu compte dans son modèle de croissance de populations bactériennes (Monod, 1942). On a pu montrer ensuite que beaucoup de modèles de la dynamique des populations peuvent être réécrits en prenant en compte de telles ressources et leur dynamique, le modèle logistique en premier (Pavé, 1993).

### Bioéconomie et modèles de gestion

Les modèles dits de bioéconomie qui associent dynamique de populations de ressources vivantes et représentations économiques viennent principalement de l'étude des pêches maritimes. L'origine vient d'une analyse économique menée par un économiste canadien, Gordon (Gordon, , à la demande de son gouvernement pour tenter d'expliquer le faible revenu des pêcheurs maritimes. Il a proposé une explication en termes économiques de l'« overfishing » (surexploitation de la ressource). Il montre comment la surexploitation économique pourrait émerger dans tout système de pêche non régulé, tandis que la surexploitation biologique se produit chaque fois que les rapports prix/coûts sont suffisamment grands. On notera au passage que les travaux de Gordon ont sans doute inspiré Hardin, pour écrire son article « *tragedy of the commons* » (Hardin, 1968)<sup>1</sup>.

Quoiqu'il en soit, un grand effort de modélisation a été fait pour combiner la dynamique de la ressource et l'économie de la pêche. L'ouvrage de référence à ce sujet reste sans nul doute celui de Colin Clark (Clark, 1985). Il n'appartient pas à un non-économiste de discuter de cet aspect des choses.

Le modèle de base choisi par les « modélisateurs des pêches » pour représenter la dynamique de la ressource est le modèle logistique ou un proche dérivé. On peut citer le modèle de base de Smith (Smith, 1969) :

<sup>1</sup> Cet article a fait coulé beaucoup d'encre. Qu'on ne se méprenne pas, il n'y a pas à proprement parler de modèle. C'est plutôt une réflexion intéressante, et... pessimiste, sur les problèmes de développements.

$$\frac{dX}{dt} = r X \left(1 - \frac{X}{K}\right) - q E X$$

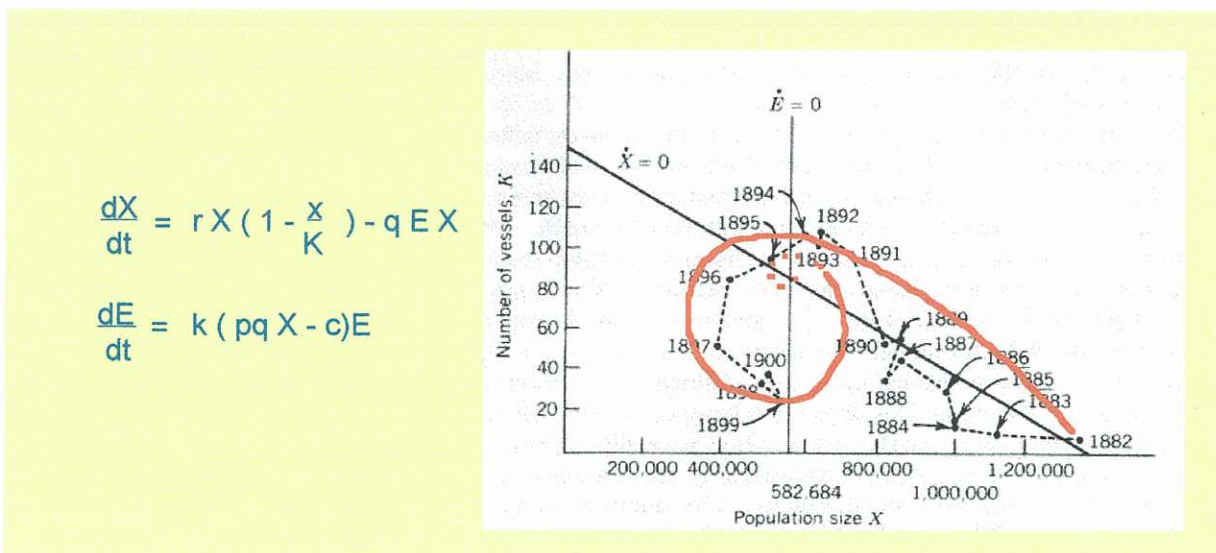
$$\frac{dE}{dt} = k (pqX - c) E$$

X est la variable mesurant la taille de la population exploitée, supposée suivre un modèle logistique. E représente « l'effort de pêche » (mesuré, par exemple, en nombre de vaisseaux d'une flotte de pêche). Plus l'effort de pêche est grand et plus la biomasse est importante, plus le prélèvement le sera (- q E X). Ce terme correspond à une mortalité additionnelle dans la première équation. Cet effort de pêche est lui-même proportionnel à la ressource (pqX), mais sera limité par le coût de mobilisation d'une unité de pêche (-c). On peut montrer qu'il existe un équilibre stable (E\* et X\*) qui préserve la ressource. L'ajustement de l'effort de pêche peut donc être fait sur des critères économiques.

Par exemple, en maximisant le profit représenté par le critère :

$$\int_0^{\infty} e^{-\delta t} (pqX(t) - c) E(t) dt \text{ (Clark, 1985), dans ce cas, il s'agit de choisir la stratégie } E(t)$$

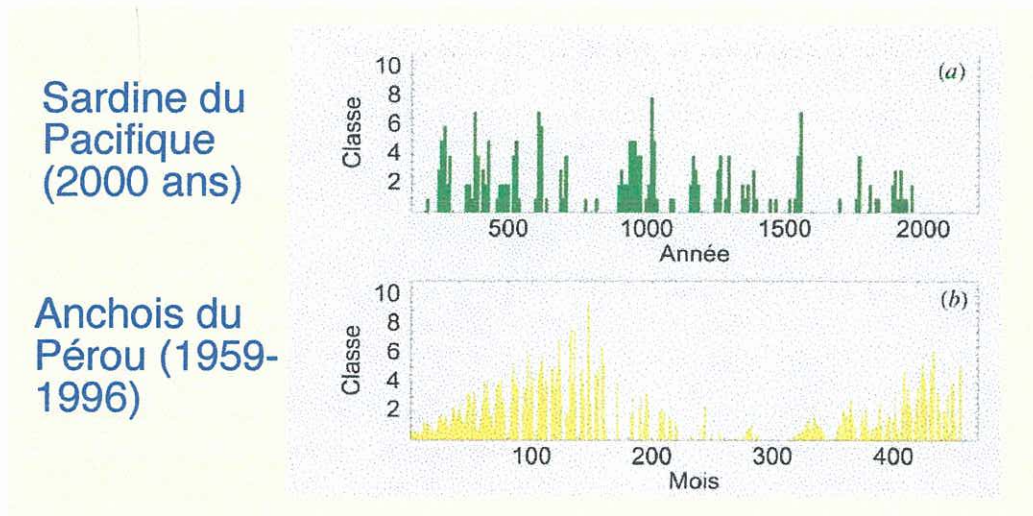
qui maximise ce critère (X(t) peut être solution de l'équation ci-dessus, E(t) évidemment non, puisqu'alors « non spontané »).



**Figure 4** – Modèle de Smith en regard de données historiques sur la pêche à la baleine (Clark, op. cit.). L'effort de pêche E est supposé proportionnel au nombre de vaisseaux K (attention aux notations qui diffèrent entre le modèle et le graphe dans le texte original). Le modèle de Smith prévoit, pour certaines valeurs des paramètres un point fixe qui est un foyer stable. Les données ne sont pas contradictoires avec ce résultat.

Cela étant, quand on examine les modèles qui ont été construits, on remarque que la dynamique de la ressource est représentée par des fonctions « régulières », qui ne présentent donc pas de dynamiques complexes pour que des « équilibres » soient « calculables ». On commence à savoir que les dynamiques sont parfois (et peut-être dans la plupart des cas) naturellement très irrégulières (ce qui n'est pas synonyme de non modélisables), ainsi que le montre le figure 3, pour la sardine du Pacifique et l'anchois du Pérou.

Comme nous l'avons déjà précisé ci-dessus, la majorité des modèles ne sont pas spatialisés. Or la ressource halieutique bouge dans les trois dimensions des mers et océans. Certains modèles de gestion dérivés du modèle de Fischer en tiennent compte. Mais là encore la dynamique de la ressource est présentée de façon sommaire (modèle logistique). Clark en conclusion de son ouvrage signale la nécessité d'avoir de meilleurs modèles de cette dynamique incluant notamment les niveaux trophiques. Une autre difficulté réside dans la prise de données : comment estimer les tailles de populations et leurs dynamiques spatio-temporelles dans un milieu « opaque » ? (Cf. par exemple la thèse de F. Gauthiez, qui pose très bien le problème, Gauthiez, 1997).



**Figure 5** – Dynamiques intermittentes (graphes tirés de Cazelles, 2001) de ressources halieutiques (raréfaction intermittente et d'origine naturelle, au moins pour la sardine du pacifique). Ce type d'observation permet de relativiser, en partie, le discours sur la « surexploitation » ou de le situer dans un nouveau contexte.

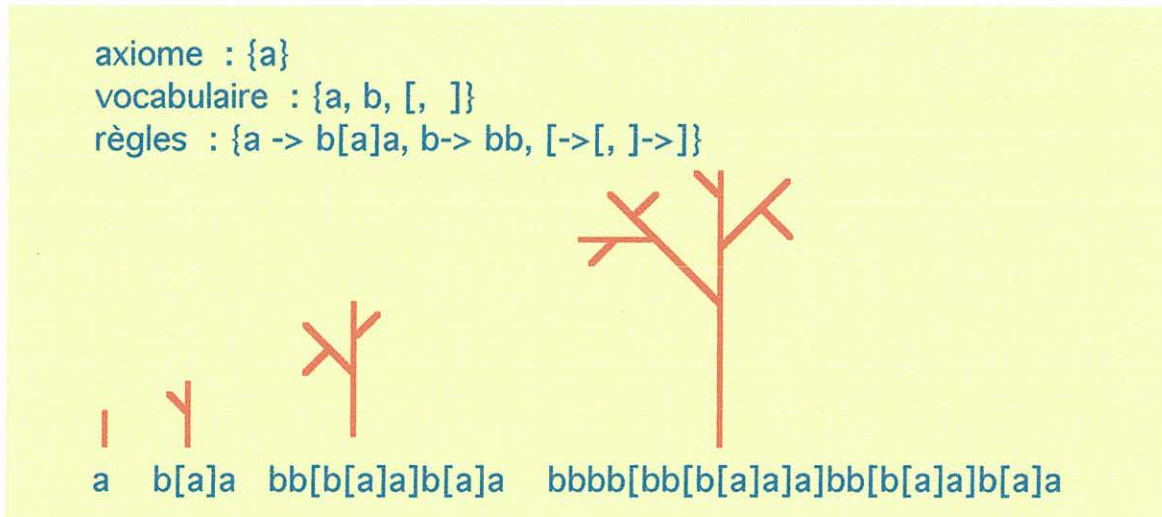
Le même type de problème a été posé pour les systèmes forestiers et la filière bois. Mais dans ce cas les problèmes sont plus simple : l'estimation de la ressource (volumes sur pied) est plus simple, la dynamique des peuplements forestiers aussi.

Enfin, on signalera quelques tentatives de dialogue, comme le colloque « Biologie et Économie » qui s'est tenu à Sophia-Antipolis, en 1988 (Malgrange et Demongeot, 1988). Mais sauf de confronter les méthodes, il n'y eut guère de tentatives de couplages ou d'intégration de modèles.

### Linguistique (L-systems)

A. Lindenmayer a proposé d'abord des modèles de développement d'organismes végétaux en supposant que les cellules étaient des automates. Or, la théorie des langages développée fin des années 50, notamment par Noam Chomsky, et les travaux précédents d'Alan Turing, avaient montré la dualité entre automates et langages. Trouvant que ce cadre théorique était plus adapté pour son approche de la morphogenèse, A. Lindemayer en a fait un premier exposé en 1971 en introduisant la notion de L-systèmes « hors-contexte » (Lindenmayer, 1971). Par la suite une véritable école s'est développée (cf. par exemple Herman et

Rosenberg, 1975) pour étudier les aspects théoriques. On peut monter au passage (et facilement) que, quantitativement, les longueurs des séquences sont décrites par un processus de ramification (si les règles sont « pondérées » par des probabilités). Convergence de langage involontaire mais qui anticipait un résultat réel.



**Figure 6** – Exemple simple de système de Lindenmayer avec un formalisme de type de celui utilisé en théorie des langages pour représenter une morphogenèse arborescente.

### Systèmes sociaux (systèmes multiagents)

De développement récent, de nouvelles approches fondées sur la modélisation informatique, on fait leur apparition. Apparus à la fin des années 1980, les systèmes multiagents, héritiers de l'intelligence artificielle (dite distribuée), sont toujours d'actualité et semblent apporter de bons résultats. Au départ, ils furent conçus pour simuler des « sociétés de robots, puis furent appliqués à la modélisation de sociétés animales (J. Ferber et A. Drogoul avec A. Lenoir et son équipe (P11) : sociétés de fourmis (Drogoul, 1993, Ferber, 1995), puis de groupe humains (cf. par exemple la thèse de Juliette Rouchier, 2001). La modélisation simultanée des la dynamique de ressources renouvelables et de dynamiques sociaux économiques est prometteuse grâce à cette approche (cf. les travaux de François Bousquet sur le delta central du Niger : modélisation système sociaux des agriculteurs-pêcheurs et de la ressource halieutique, puis les nombreux travaux du laboratoire GREEN<sup>2</sup> du CIRAD depuis, cf. par exemple, Bousquet, 2001).

### Conclusion

*Il n'y a pas de science sans modèles...*

La modélisation dans de nombreux domaines des SDV et des SHS ont été conduits, soit en synergie, soit en parallèle, soit en complément, soit en inspiration réciproque. En fait les difficultés et quelquefois les problématiques sont très voisines (même identiques pour la démographie). Ainsi, comme il était annoncé dans le titre : les croisements entre les pratiques

<sup>2</sup> Gestion des ressources et environnement



de la modélisation en sciences de la vie et en sciences humaines et sociale ont été créatifs. On remarque aussi que la modélisation est une méthodologie très employée dans ces deux secteurs<sup>3</sup>. Un bilan quantitatif est prématuré, mais on peut penser que les différences ne sont pas très grandes.

On peut donc penser, à l'image de ce qui se passe déjà, mais encore trop ponctuellement, que la modélisation simultanée de dynamiques naturelles et de dynamiques sociale est possible, sans doute même nécessaire (par exemple pour concevoir de nouveaux modèles et modes de gestion des ressources naturelles renouvelables). La construction de tels modèles est plus une affaire d'équipe que d'individu.

Outre l'intérêt opérationnel (espéré), on découvrira (ou on redécouvrira), que le modèle est un excellent médiateur interdisciplinaire. Que la discussion intègre les données disponibles ou accessibles : les données sont nécessaires au modèle ; le modèle est nécessaire au recueil de données pertinentes (*Model need data. Data need model*). Cependant, on a mis en évidence quelques points, d'une part et d'autre (et ensemble !), sur lesquels de progrès peuvent être espérés (et quelque fois acquis à « faible coût »). Par exemple, en dynamique des populations introduire un niveau suffisant de chaîne trophique (une population croit et se maintient en consommant des ressources, représenter la dynamique de ces ressources peut souvent être bénéfique). Dans les deux cas, la spatialisation de données va inciter à élaborer des modèles spatio-temporels.

Enfin, on peut rêver, progrès ultime, le couplage ou l'élaboration de modèles prenant en compte des dynamiques physique-chimiques des milieux, des dynamiques bio-écologiques et des dynamiques sociales sont peut-être à notre portée. On notera aussi, ce qui n'est pas abordé dans cet exposé, que les vocabulaires techniques de la modélisation sont très voisins entre SDV et SHS, similaires avec SPI (un économètre, un biométricien, un automaticien et un informaticien se comprennent plutôt bien), mais différent quelque peu avec les sciences physiques qui furent pourtant le berceau incontesté de ce qu'on appelle aujourd'hui « modélisation ». Ce n'est pas insurmontable, il suffit de le savoir.

On peut donc espérer (ou affirmer) que le modèle (et les données), comme nous l'avons déjà dit par ailleurs (Cl. Schmidt et A. Pavé, 1999, 2002), soit ou est déjà un véritable trait d'union entre les disciplines.

---

<sup>3</sup> Et beaucoup plus importante et diverse, dans les sciences de l'homme et de la société que ne le laisse voir le dossier « mathématiques sociales » de Pour la Science.

## Références

- Benzécri J.P., 1982. Histoire et préhistoire de l'analyse des données. Dunod, Paris
- Bousquet F., 1994. Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulation multi-agents. Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger. *Thèse de l'Université Claude Bernard - Lyon 1*, 1994.
- Bousquet F., 2001. Modélisation d'accompagnement. Simulation multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables. Mémoire d'HdR, Université Claude Bernard Lyon 1, 2001.
- Bousquet F., Cambier C., Mullon C., Morand P., Quensièrre J. and Pavé A., 1993. Simulating the Interaction Between a Society and a Renewable Resource. *Journal of Biological Systems*. 1:2, 199-214.
- Cazelles B., 2001. *Non linéarité et stochastique en dynamique des populations*. Mémoire d'HDR, université Pierre et Marie Curie – Paris VI.
- Clark W.C., 1985. *Bioeconomic Modelling and Fisheries Management*. John Wiley, New York.
- Demongeot J, Malgrange P. (Eds), 1988. *Biologie et Économie : les apports de la modélisation*. Institut de mathématiques économiques, série d'économétrie appliquée, Dijon.
- Drogoul A., 1993. *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- Ferber J., 1995. Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective. InterEdition, Paris.
- Fibonacci (Leonard de Pise), 1228. *Liber abaci*. (cité par Collette J.P., 1977, Histoire des mathématiques. Ed. du nouveau pédagogique. Montréal.)
- Gauthiez F., 1997. *Structuration spatiale des populations de poissons marins demersaux Caractérisation, conséquences biométriques et halieutiques*. Thèse de l'Université Claude Bernard - Lyon 1.
- Gordon, H.S., 1954. The economic theory of a common property resource : the fishery. *J. Polit. Econ.*, 62, 124-142.
- Hardin G., 1968. The tragedy of the commons. *Science*, 162, 1243-1247.
- Herman G.T., Rosenberg G., 1975. *Developmental systems and languages*. North-Holland.
- Le Bras H., 1999. L'invention des concepts en démographie. Dossier « mathématiques sociales », Pour la Science.
- Lindenmayer A., 1971. Developmental systems without cellular interaction, their languages and grammars. *Journal of theoretical biology*, 30, 455-484.
- Ludwig D., 1976. Some mathematical problems in the management of biological resources. *Appl. Maths Notes*, 2, 39-56.
- Pavé A., 1993. Interpretation of population dynamics models by using schematic representations. *Journal of Biological Systems*. 1:3, 275-309, 1993.
- Rouchier J., 2000. *La confiance à travers l'échange. Accès aux pâturages au Nord-Cameroun et échanges non-marchands : des simulations dans des systèmes multi-agents*. Thèse de l'Université d'Orléans, 2000.
- Schmidt-Lainé Cl., Pavé A., 1999. La modélisation comme trait d'union. *Le Figaro*, 11 janvier 1999.
- Schmidt-Lainé Cl., Pavé A., 2002. Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire. À paraître dans *Natures-Sciences-Sociétés*.
- Verhulst P.F., 1848. Deuxième mémoire sur la loi d'accroissement de la population. *C.R. Académie Royale de Belgique*, XX, 3-32.
- Verhulst P.F., 1844 - Recherche mathématique sur la loi d'accroissement de la population. *C.R. Académie Royale de Belgique*, XVIII, 1-32