

François Perroux et Ilya Prigogine: Systèmes complexes et science économique

Philippe Crabbé

Volume 29, numéro 2, 1998

L'économie du XX^e siècle de François Perroux à la mondialisation

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/703883ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/703883ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Institut québécois des hautes études internationales

ISSN

0014-2123 (imprimé)

1703-7891 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Crabbé, P. (1998). François Perroux et Ilya Prigogine: Systèmes complexes et science économique. *Études internationales*, 29(2), 405–421.
<https://doi.org/10.7202/703883ar>

Résumé de l'article

Perroux s'intéressait aux travaux de Prigogine, un des fondateurs de la pensée complexe. Ce dernier avait introduit la notion de structure dissipative auto-organisatrice dans les systèmes thermodynamiques irréversibles loin de l'équilibre. Un système est complexe s'il peut être compris au moyen de la pensée complexe telle que définie par Morin et, à condition d'être représentable mathématiquement, s'il est doté d'une dynamique complexe au sens mathématique du mot. Cette dynamique complexe correspond aux propriétés asymptotiques (par application de la loi des grands nombres et existence de points fixes) d'un système d'équations différentielles déterministes auquel est donnée une interprétation stochastique tant par Prigogine en thermodynamique que par Arthur en science économique. Tout comme Perroux, Arthur examine des situations de rendements croissants sujettes à effets de rétroaction positive et à effets de réseau. Ces situations permettent de rendre compte de l'évolution de la technologie et de la localisation de l'activité économique parmi d'autres phénomènes. Dans le cadre de l'économie évolutive, Kaufman étudie la connectivité du tissu mouvant des relations économiques par le truchement des paysages d'aptitudes tandis que Holland étudie ces relations par le truchement d'algorithmes génétiques. Ces situations permettent de rendre compte de la multiplicité des usages de nouveaux produits et de leur combinaison avec des produits déjà existants ainsi que des stratégies adaptatives à leur égard.

François Perroux et Ilya Prigogine : Systèmes complexes et science économique

Philippe CRABBÉ*

« If the economic web grows more tangled and complex, what governs the structure of that web? »
(S. Kaufman, *At Home in the Universe*, 1995).

« The global economy is an example, par excellence, of an adaptive nonlinear network. » (J. H. HOLLAND dans P. W. ANDERSON, K. J. ARROW et D. PINES, *The Economy as an Evolving Complex System*, 1988).

« ... l'action aléatoire de la probabilité engloutira toujours l'ordre, la structure... mais ... pour la création d'un nouvel ordre, l'action du hasard est une nécessité ». (G. BATESON cité dans J. BRUNET dans COLLOQUE DE CERISY, *Arguments pour une méthode* (Autour d'Edgar Morin), 1990)¹.

RÉSUMÉ : Perroux s'intéressait aux travaux de Prigogine, un des fondateurs de la pensée complexe. Ce dernier avait introduit la notion de structure dissipative auto-organisatrice dans les systèmes thermodynamiques irréversibles loin de l'équilibre. Un système est complexe s'il peut être compris au moyen de la pensée complexe telle que définie par Morin et, à condition d'être représentable mathématiquement, s'il est doté d'une dynamique complexe au sens mathématique du mot. Cette dynamique complexe correspond aux propriétés asymptotiques (par application de la loi des grands nombres et existence de points fixes) d'un système d'équations différentielles déterministes auquel est donnée une interprétation stochastique tant par Prigogine en thermodynamique que par Arthur en science économique. Tout comme Perroux, Arthur examine des situations de rendements croissants sujettes à effets de rétroaction positive et à effets de réseau. Ces situations permettent de rendre compte de l'évolution de la technologie et de la localisation de l'activité économique parmi d'autres phénomènes. Dans le cadre de l'économie évolutive, Kaufman étudie la connectivité du tissu mouvant des relations économiques par le truchement des paysages d'aptitudes tandis que Holland étudie ces relations par le truchement d'algorithmes génétiques. Ces situations permettent de rendre compte de la multiplicité des usages de nouveaux produits et de leur combinaison avec des produits déjà existants ainsi que des stratégies adaptatives à leur égard.

ABSTRACT : Perroux was interested in the contributions of Prigogine who was one of the founders of complex system thinking. Prigogine introduced the concept of self-organizing dissipative structure for irreversible thermodynamic systems far from equilibrium. A system is complex if it can be understood by complex thinking as defined

* Directeur de l'Institut de recherche sur l'environnement et l'économie, professeur au Département de science économique de l'Université d'Ottawa.

1. Je remercie les professeurs Bartoli et Leroy de m'avoir introduit aux travaux d'Edgar Morin et de Jean-Louis Le Moigne.

by Morin and, at the condition of being representable mathematically, if it is endowed with a complex dynamics as defined in Mathematics. This complex dynamics corresponds to the asymptotic properties (according to the law of large numbers and fixed points) of a deterministic system to which one assigns a stochastic interpretation whether in Thermodynamics (Prigogine) or in Economics (Arthur). As much as Perroux, Arthur examines increasing returns situations subject to positive feed-backs and network effects. These situations allow to interpret the evolution of technology and the localisation of economic activity among others. In the framework of evolutionary economics, Kaufman studies the connectivity of the moving tissue of economic relations through the use of fitness landscapes while Holland studies them through the use of genetic algorithms. These situations allow for the interpretation of the multiplicity of uses of new products and of their combinations with existing products as much as the adaptive strategies towards them.

Lorsque François Perroux séjourna à l'Université d'Ottawa il y a maintenant quelque quinze ans, il s'intéressait beaucoup à deux sujets : la théorie de la mesure, que Robert Aumann et Werner Hildenbrand avaient introduite en science économique quelques années plus tôt, et la théorie des systèmes complexes fondée au moins partiellement par Ilya Prigogine, Prix Nobel de chimie et membre de l'école thermodynamique de Bruxelles². L'intérêt de Perroux dans la théorie de la mesure était naturel puisqu'il s'était toujours intéressé aux groupes de pression en économie et puisque la théorie de la mesure permettait de les formaliser autour du concept de noyau. À l'époque, son intérêt pour les systèmes complexes nous laissait plutôt sceptique parce que nous n'y connaissions rien. Il nous avait fait lire un article de Prigogine, fort difficile à cause de ses mathématiques (opérateurs). Le cheminement de ces mathématiques est maintenant bien vulgarisé dans *La fin des certitudes*³. L'article s'intitule « Entropie et dynamique » et a été publié en 1974 dans une revue qui s'appelait *Entropie*.

Dans cet article, Prigogine critique une hypothèse de Boltzmann dans laquelle ce dernier estimait pouvoir remplacer la dynamique de l'entropie par des processus stochastiques en partant d'une hypothèse de chaos moléculaire. Au contraire, Prigogine y prouve que la loi de l'entropie croissante et son caractère irréversible font partie intégrante de la dynamique déterministe (il s'agit entre autres de prouver l'existence d'une fonction de Lyapunov et de donner une interprétation probabiliste à des équations déterministes en renversant le cheminement de Boltzmann) indépendamment de toute hypothèse de voisinage de l'équilibre. Prigogine dit ceci : « la description probabiliste émerge en quelque sorte de la dynamique au lieu d'y avoir été introduite *a priori* » comme l'avait fait Boltzmann⁴. Prigogine continue : « les applications à la thermodynamique ne se limitent plus aujourd'hui aux états d'équilibre ni même aux états voisins de ceux-ci. Les méthodes thermodynamiques sont

2. R. AUMANN, « Markets with a Continuum of Traders », *Econometrica*, 32, 1964, pp. 39-50 ; W. HILDENBRAND, « On Economies with Many Agents », *Journal of Economic Theory*, 2, 1970, pp. 161-188.

3. I. PRIGOGINE, *La fin des certitudes*, Paris, Éditions Odile Jacob, 1996.

4. *Ibid.*, p. 10.

actuellement appliquées avec succès à des situations dans lesquelles l'irréversibilité joue un rôle central⁵ ». Il cite ensuite une de ses contributions antérieures à la même revue⁶ : « La thermodynamique classique a résolu le problème de la compétition entre le chaos et l'organisation pour les systèmes en équilibre. Mais qu'arrive-t-il à grande distance de l'équilibre ? Ne pouvons-nous pas rencontrer dans cette région des organisations entièrement nouvelles, sous forme de structures stabilisées par interaction avec le monde extérieur ? La réponse est affirmative ; ces nouvelles structures liées à l'existence même du non-équilibre sont ce que nous avons appelé les structures dissipatives. Leur étude ouvre un nouveau chapitre de la thermodynamique⁷. » Finalement : « L'étude des structures dissipatives se poursuit activement tant en hydrodynamique, qu'en chimie physique ou en biologie⁸. » Perroux, clairement, aurait voulu ajouter à cette liste la science économique !

C'est par le biais de l'environnement que nous avons, plus de dix ans plus tard, compris l'intérêt de Perroux pour les systèmes complexes⁹. C'est par le biais de l'environnement également que nous avons appris que le fondateur présumé de la théorie des systèmes, Ludwig Von Bertalanffy avait enseigné à la Faculté de Génie de l'Université d'Ottawa avant de partir pour l'Université de Toronto où il y a formé les Buzz Holling, Henry Regier, George Francis et Carl Walters, c'est-à-dire les têtes de la pensée environnementale canadienne, avant de partir pour l'Université d'Alberta. Il existe maintenant au Canada une deuxième génération de ces penseurs environnementaux qui inclut James Kay, un expert de la thermodynamique des systèmes irréversibles ouverts loin de l'équilibre, qui concentre ses intérêts de recherche sur les systèmes socio-écologiques. Il est intéressant de savoir également qu'un précurseur important de la théorie des systèmes y soit arrivé par le biais de l'environnement. Il s'agit d'Alexandre Bogdanov dans ses « Essais de tectologie : la science générale de

5. *Ibid.*, p. 10.

6. I. PRIGOGINE, « Éditorial », *Entropie*, 2, 1970, pp. 34-35.

7. *Ibid.*, pp. 6-7

8. *Ibid.*, p. 7.

9. Une bonne et succincte introduction historique à la théorie des systèmes se trouve chez J. L. Le MOIGNE, *Les systèmes de décision dans les organisations*, Paris, Presses Universitaires de France, 1974, chap. 1, « La théorie des systèmes », et chez E. W. PLOWMAN, « Introduction ; la science et la pratique de la complexité : réflexions sur l'état actuel des connaissances », dans IDATE/UNIVERSITÉ DES NATIONS UNIES, *Science et pratique de la complexité*, Actes du colloque de Montpellier Mai 1984, La Documentation française, 1986, pp. 15-32. Le terme système complexe semble avoir été introduit par Warren Weaver en 1947 et celui de « holisme » par Jan Smuts en 1926. Les contributions les plus importantes semblent dues à Manfred EIGEN, Ilya PRIGOGINE et Herbert SIMON, E. W. PLOWMAN, *op. cit.* Les contributions dans le domaine de l'environnement par le biais de l'écologie sont surtout dues à Buzz Holling et Ramon Margalef sans oublier les travaux de pionnier de l'écologiste soviétique Stanchinskii sur la circulation de l'énergie dans les écosystèmes dans le courant des années vingt, IDATE/UNIVERSITÉ DES NATIONS UNIES, *Science et pratique de la complexité*, *op. cit.* ; A. E. GARE, *Postmodernism and the Environmental Crisis*, Routledge, 1995. En science économique, il faut noter spécialement la contribution de René Passet qui faisait partie du groupe des dix autour d'Edgar Morin (R. PASSET, *L'Économie et le vivant*, Paris, Economica, 1996. [2^e éd.] ; COLLOQUE DE CERISY, *Arguments pour une méthode (Autour d'Edgar Morin)*, Seuil 1990.).

l'organisation », publiés en Russie entre 1912 et 1922 ; Bogdanov se préoccupait davantage de l'organisation de l'énergie utile (exergie) dans la production plutôt que son appropriation en tant que plus-value comme l'avait fait son prédécesseur Serhii Podolinski. Le but de Bogdanov était de créer une nouvelle science prolétarienne qui serait une étude des lois et formes d'organisation de tous les éléments de la nature, de la pratique et de la pensée et qui, par là, permettrait de surmonter tous les dualismes créés par le capitalisme. L'essai de création d'une science prolétarienne fut essentiellement qualifié de révisionniste et rejeté par le marxisme en Union Soviétique¹⁰.

Les racines postmodernes de la pensée systémique remontent à Giambattista Vico qui a rejeté le réductionnisme cartésien et la distinction sujet-objet, en passant par l'intuitionnisme d'Henri Bergson et l'expérience continue d'Alfred North Whitehead. Les deux derniers mettent l'accent sur une vision de la nature en tant qu'ensemble de processus incluant les humains à part entière mais en tant qu'êtres culturels. C'est ce que Prigogine appelle « La Nouvelle Alliance » entre les sciences de l'homme et celles de la nature¹¹.

I – La science des systèmes complexes

Au niveau terminologique, un système est un ensemble d'éléments, de leurs attributs et des relations entre eux¹². Un système isolé n'a pas d'extérieur. Un système qui possède un extérieur est ouvert (Prigogine 1976). Une propriété d'un système qui s'applique à l'ensemble du système et non à ses éléments est dite émergente¹³. En science économique, nous dirions plutôt qu'une propriété émergente est structurelle au sens que donnait à ce mot Herman Wold¹⁴. Lorsqu'en économétrie des systèmes d'équations simultanées, on parle de système causal ou lorsque dans l'étude des modèles linéaires du style analyse d'activités on parle de système décomposable, on parle de propriétés émergentes. Il est remarquable que les écologues utilisent les mêmes mathématiques que nous, économistes, lorsqu'ils étudient la connectivité dans les écosystèmes (l'indice d'ascendance d'Ulanowicz par exemple)¹⁵. Un système est dit complexe si son fonctionnement ne peut être compris par des expériences contrôlées, typiques de la science réductionniste, qui étudient causes et effets simples¹⁶. Comme le dit E. Morin, la pensée complexe est gouvernée par trois principes : le dialogique, le récursif et l'hologrammatique. Le premier signifie l'association de deux principes à la fois complémentaires et antagonistes telle l'opposition hégélienne thèse-antithèse. Le second signifie ce qui est capable d'auto-organisation. Le troisième signifie que la partie

10. A. E. GARE, *op. cit.*

11. *Ibid.*

12. D. BERLINSKI, *On Systems Analysis*, Cambridge, MIT Press, 1976.

13. P. CHECKLAND et J. SCHOLÉS, *Soft Systems Methodology in Action*, New York, Wiley, 1992.

14. E. J. MOSBAEK et H. WOLD, *Interdependent Systems: Structure and Estimation*, Amsterdam, North-Holland, 1970.

15. S. E. JOERGENSEN, *Integration of Ecosystem Theories: A Pattern*, Norwell, Kluwer, 1992.

16. P. CHECKLAND et J. SCHOLÉS, *op. cit.*

reflète le tout un peu comme la monade de Leibniz reflétait tout l'univers de son point de vue¹⁷. Un système complexe est aussi doté d'une dynamique complexe au sens mathématique du mot, c'est-à-dire d'une dynamique qui n'est pas liée uniquement à l'étude d'états stationnaires (« steady-state »)¹⁸. Techniquement, une dynamique est simple si asymptotiquement elle manifeste un mouvement périodique caractérisé par un nombre fini de valeurs périodiques¹⁹. Un cycle de période 1 est un état stationnaire (steady-state). Les systèmes complexes sont sujets à effets de rétroaction soit négatifs ou équilibrants soit positifs ou déséquilibrants (système de la toile d'araignée bien connu en science économique). Un système à effets de rétroaction positive est dit autocatalytique. Les systèmes autocatalytiques sont dits auto-organisateurs si de nouvelles structures émergent à partir de l'évolution du système. Les systèmes autocatalytiques forment une écologie de compétiteurs et de mutualistes c'est à dire une « économie²⁰ ».

La théorie des systèmes complexes est fondée sur des théories mathématiques, d'abord celles des systèmes d'équations différentielles (ou aux différences finies) non-linéaires, ensuite celle du chaos et finalement celle des nombres fractals sur laquelle nous ne nous étendrons pas ici²¹. La première permet une multiplicité d'équilibres pour des systèmes co-évoluant d'équations couplées du genre prédateur-proie à la manière de Lotka-Volterra. La deuxième permet des comportements tel celui d'un tas de sable contraint dans un enclos. Si l'on part avec un tas relativement plat, on commence par une phase sous-critique relativement ordonnée où les additions de sable créent de légères avalanches. Ensuite vient une phase critique où les additions supplémentaires génèrent de grandes avalanches lorsqu'on ajoute davantage de sable. Finalement se produit une étape super-critique lorsque l'enclos est enlevé ; ce qui, par là, crée d'encore plus grandes avalanches qui permettent le retour à l'état critique, un état stable²². On dira que l'état critique est un attracteur pour une perturbation quelconque, dans ce cas-ci la suppression de l'enclos. Ces systèmes chaotiques sont très dépendants de leurs conditions initiales – la hauteur du tas – y compris de faibles perturbations aléatoires de ces conditions. Ils sont donc non-ergodiques ; ils dépendent de toute leur histoire. Dans ces systèmes, le hasard (les perturbations des conditions initiales) et la nécessité (la dynamique déterministe) interagissent.

17. R. H. DAY, *Complex Economic Dynamics*, vol. 1, Cambridge, MIT Press, 1994 ; E. MORIN, « Messie, mais non », dans COLLOQUE DE CERISY, *Arguments pour une méthode (Autour d'Edgar Morin)*, Paris, Seuil, 1990.

18. R. H. DAY, *op. cit.*

19. *Ibid.*

20. S. KAUFMAN, « The Evolution of Economic Webs », dans P. W. ANDERSON, K. J. ARROW et D. PINES, dir., *The Economy as Evolving Complex System*, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1988.

21. G. SILVERBERG, « Modelling Economic Dynamics and Technical Change: Mathematical Approaches to Self-Organization and Evolution », c. 24 dans G. DOSI, C. FREEMAN, R. NELSON, G. SILVERBERG et L. SOETE, dir., *Technical Change and Economic Theory*, London, Pinter Publishing 1988.

22. S. KAUFMAN, « The Evolution... », *op. cit.*

La théorie des systèmes complexes s'est développée également à partir de la thermodynamique. La thermodynamique n'est pas tout à fait étrangère aux économistes. Celle qu'ils connaissent, c'est la thermodynamique des systèmes isolés au voisinage de l'équilibre avec ses deux lois principales bien connues. Toutefois, la problématique de Prigogine, comme celle de Schrödinger, était de réconcilier la thermodynamique classique des systèmes isolés et la biologie. La thermodynamique classique avec sa loi d'entropie croissante met l'accent sur la dégradation de l'exergie, de l'énergie utile capable d'effectuer un travail telle celle engendrée par la machine à vapeur ; cette dégradation consiste en une désorganisation croissante, une perte d'information et l'irréversibilité (la flèche du temps d'Eddington au niveau macroscopique) tandis que la biologie met l'accent sur l'organisation croissante par l'évolution, l'accroissement de la complexité. Si l'univers est approximativement un système isolé – il en est en fait un mauvais exemple par ce qu'il n'est pas borné – comment se fait-il que l'évolution semble triompher de l'entropie qui devrait être croissante ? C'est le paradoxe que Prigogine a essayé de résoudre.

D'abord, Prigogine se concentre sur les systèmes ouverts. Pourquoi ? Parce que les entités biologiques comme vous et moi sommes des systèmes ouverts. Nous prenons constamment la matière et l'énergie dans l'environnement et la restituons sous forme dégradée. Le système économique est un système ouvert : ses intrants proviennent de l'environnement et n'entrent dans la sphère économique qu'une fois qu'ils ont acquis une valeur. Le « mur » séparant l'intérieur de l'extérieur est ici endogène²³. Donc, la thermodynamique des systèmes isolés n'est pas adéquate pour rendre compte du vivant et des systèmes économiques. Il existe une thermodynamique des systèmes ouverts au voisinage de l'équilibre qui, elle non plus, n'est pas adéquate pour rendre compte des phénomènes d'auto-organisation. Cette thermodynamique dit qu'un système ouvert au voisinage d'un état stationnaire (« steady-state »), c'est-à-dire d'un système en équilibre interne avec des flux d'énergie intrant et extrant égaux en quantité (la baignoire à niveau d'eau constant sans bouchon et avec robinet ouvert en est un exemple), minimise l'entropie en important un maximum d'exergie (néguentropie ou énergie utile) pour compenser l'entropie. Au voisinage de l'état stationnaire (« steady-state »), l'état du système peut être décrit par un système d'équations différentielles linéaires dont les propriétés qualitatives de stabilité sont bien continues. Les phénomènes d'observation révèlent des changements brusques des propriétés de stabilité des systèmes. Par exemple, la transformation d'un écosystème forestier en prairie et puis en désert ou d'un lac mésotrophique en lac eutrophique manifeste des ruptures de continuité par la substitution de nouvelles espèces aux espèces indigènes. L'effondrement de l'ex-Union Soviétique ne peut être décrit par un système où le bénéfice marginal du changement égale son coût marginal. La marge n'est plus définie dans ces phénomènes de transformation brusque. Si le système thermodynamique est ouvert de façon à pouvoir

23. S. AMIR, *Economics and Thermodynamics: An Exposition and its Implications for Environmental Economics, Resources for the Future*, D.P. QE 9-04, 1991.

importer l'exergie et rejeter son énergie dégradée et est situé loin de l'équilibre, on ne peut plus décrire son comportement par des équations linéaires.

Il faut maintenant utiliser des équations différentielles non-linéaires (qui ne peuvent être linéarisées puisqu'on n'est plus au voisinage de l'équilibre) qui sont dotées de multiples équilibres, d'équilibres structurellement stables c'est-à-dire d'attracteurs et qui peuvent avoir des comportements chaotiques c'est-à-dire des discontinuités (échappant ainsi à leur domaine de définition) dans leurs propriétés de stabilité. Ces systèmes thermodynamiques ouverts sont auto-organisateurs. C'est-à-dire que, selon le gradient d'exergie qu'ils importent, ils peuvent présenter des structures nouvelles. Ces structures, qui correspondent à des attracteurs, sont des lieux d'entropie maximum (d'où le nom de structure dissipative) dans la mesure où ces structures dégradent l'exergie avec grande efficacité, énergie qui est rejetée ensuite dans l'environnement. Donc l'entropie est toujours valide même loin de l'équilibre²⁴. Toutefois, ces structures utilisent l'exergie également pour se maintenir à distance d'un autre équilibre du système. La deuxième loi de la thermodynamique reformulée par Kestin dit qu'un système qui est déplacé de son équilibre par une force extérieure utilisera tous les moyens disponibles pour contrecarrer ce déplacement et ceci d'autant plus que la force extérieure est considérable²⁵. Un exemple familier est l'ouragan qui acquiert une structure nouvelle, le tourbillon, grâce auquel il fait baisser rapidement la température atmosphérique. Du point de vue mathématique, la structure correspond aux propriétés asymptotiques (dérivées par approximations en cas d'événements discrets) d'un système d'équations différentielles stochastiques (à cause des perturbations stochastiques de conditions initiales) telle l'existence d'un point fixe d'un système déterministe équivalent (par application d'une loi des grands nombres)²⁶.

Ce phénomène de dégradation efficace de l'exergie fait penser à la destruction créatrice de Schumpeter puisque la destruction, l'entropie maximale, est nécessaire à l'apparition de nouvelles formes d'organisation dont l'innovation²⁷. Schumpeter (nourri sans doute de la musique de Wagner à l'opéra de Vienne!), parle également de « tempêtes de destruction ». Il n'est pas surprenant que les écologistes tel Buzz Holling aient sauté sur la métaphore avec sa fameuse figure Ω pour décrire l'évolution des écosystèmes²⁸. Comme le dit

24. I. PRIGOGINE, « Order through Fluctuation: Self-Organisation and Social Systems », dans E. JANTSCH et C. H. WADDINGTON, dir., *Evolution and Consciousness*, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1976; I. PRIGOGINE, P. M. ALLEN et R. HERMANN, « Long-term Trends and the Evolution of Complexity », dans E. LASZLO et J. BIERMAN, *Goals in a Global Community*, vol. 1, Oxford, Pergamon, 1977.

25. E. D. SCHNEIDER et J. KAY, « Life as a Manifestation of the Second Law of Thermodynamics », *Mathematical Computation and Modelling*, 19, 1994.

26. W. B. ARTHUR, *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, Michigan, University of Michigan Press, 1994.

27. J. SCHUMPETER, *Capitalism, Socialism and Democracy*, [3^e éd.], Boulder, Harper, 1950.

28. C. S. HOLLING, D. W. SCHINDLER, B. W. WALKER et J. ROUGHGARDEN, « Biodiversity in the Functioning of Ecosystems », dans C. PERRINGS, C. FOLKE, K. G. MALER et A. M. JOHANSON, dir., *Biodiversity Loss: Economic and Ecological Issues*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

Brian Arthur, « l'automobile arrive et chasse le cheval. Avec la disparition du cheval, s'en vont selleries, étables, les marchands de harnais, les voitures et, dans l'ouest américain, le Pony express. Une fois les automobiles arrivées, il est logique d'étendre l'industrie du pétrole, les postes à essence étalés dans la campagne, et de paver les rues. Une fois les routes pavées, les gens commencent à conduire partout au sein de la création, d'où l'utilité d'avoir des motels. Et avec la vitesse, nous avons des feux de circulation, des policiers pour diriger la circulation, des tribunaux pour les conflits liés à la circulation et des pots-de-vin pour éviter les contraventions²⁹ ». L'évolution de la technologie est donc co-évolution qui crée des niches. « Les nouvelles technologies entrent (comme l'automobile), éliminent d'autres (comme le cheval, la voiture et le sellier) et, cependant, créent des niches qui invitent d'autres technologies encore plus nouvelles (routes pavées, les motels et les feux de circulation)³⁰. » L'économie en constante transformation ressemble à l'évolution de la biosphère³¹. Peut-être la diversité des biens et services est-elle nécessaire à une diversification des technologies (supercriticalité). Les nouvelles technologies commencent par s'établir par une phase de rendements croissants (la courbe d'apprentissage). Le commerce international peut encourager la diversité des produits en augmentant la taille des marchés. Apparemment, ce phénomène est vérifié en économie urbaine : la croissance de la ville est liée à sa diversité, un point déjà mentionné par Perroux dans sa note sur les pôles de croissance³². L'aide internationale pourrait devoir se concentrer sur la formation de réseaux dans les pays en voie de développement³³.

La théorie des pôles de croissance de Perroux est que des secteurs industriels de pointe lanceraient un processus de croissance autocatalytique qui rayonnerait à travers toute l'économie. Perroux parle d'industries complémentaires telles que matière première, énergie et transport. Il parle également, en termes très prigoginiens, d'oligopoles déstabilisants qui viennent remplacer les activités économiques anciennes. Il parle du rôle de la proximité et des contacts humains dans ces pôles de croissance. On voit clairement chez Perroux l'antécédent de ce que nous appelons aujourd'hui les effets de réseau³⁴. Si on étend ce processus de croissance aux régions défavorisées, les disparités entre régions auraient tendance à disparaître. N'étant pas spécialiste de ces questions d'économie du développement, nous ne nous étendrons pas davantage sur la théorie des pôles de croissance de Perroux qui nous apparaît controversée³⁵. Il est remarquable que Nicolis et Prigogine aient eux-mêmes choisi la ville avec deux types de consommateurs et deux alternatives comme

29. S. KAUFMAN, *At Home in the Universe*, Oxford, Oxford University Press, 1995, p. 279.

30. *Ibid.*

31. *Ibid.*

32. F. PERROUX, « Note sur la notion de pôle de croissance », *Économie appliquée*, 7, 1955.

33. W. B. ARTHUR, *op. cit.*

34. M. KATZ et C. SHAPIRO, « System Competition and Network Effects, *Journal of Economic Perspectives* », 8, 1994.

35. C. WEAVER, *Regional Development and the Local Community: Planning, Politics and Social Context*, New York, Wiley, 1984.

illustration de la complexité³⁶. Ils disent ceci : « Un résultat très intéressant émergeant du modèle est le suivant. Si une nouvelle activité est lancée à un certain moment, elle croîtra et se stabilisera. Si l'endroit est bien choisi, elle peut même empêcher le succès d'essais similaires effectués dans le voisinage. Cependant, si la même activité est lancée à un moment différent, elle peut ne pas réussir ; elle peut régresser à zéro et représenter une perte complète. Ceci illustre les dangers du court terme, de la planification étroite basée sur l'extrapolation directe de l'expérience passée. De telles méthodes statiques menacent la société de fossilisation ou, dans le long terme, d'effondrement. Le message principal de la modélisation dynamique défendue dans cette section est que la capacité adaptative des sociétés est la source principale leur permettant de survivre dans le long terme, d'innover d'elles-mêmes et de produire l'originalité³⁷. »

II – Complexité et science économique

Quelle est l'utilité de tout ceci pour la science économique ? Tout d'abord, il n'est de secret pour personne que l'essentiel de la théorie micro-économique est statique. Il suffira pour s'en convaincre de feuilleter l'ouvrage récent de théorie micro-économique de Mas-Colell, Whinston et Green³⁸. Le concept d'équilibre, qui est au cœur de la théorie micro-économique, est une vue de l'esprit puisque le monde réel n'est jamais en équilibre. De plus, les effets de rétroaction considérés sont négatifs. Si le prix du pétrole augmente, l'exploration de même que la conservation augmenteront et on arrivera par nécessité à un nouvel équilibre. Cet équilibre est unique et aussi optimal. L'histoire est sans importance ; seul l'équilibre inévitable compte. Il est ergodique. Cet équilibre est réversible ; l'ordre dans lequel les consommateurs commandent leur pétrole et les offreurs vendent leur pétrole est sans aucune importance. Les paramètres structurels d'une économie changent tout le temps. Il y a belle lurette que les historiens économistes ont compris ceci. D. North disait que la théorie micro-économique étudiait les choix optimaux sous contraintes mais que l'histoire économique étudiait l'évolution des contraintes³⁹.

Une série de problèmes économiques contemporains et même plus anciens s'expliquent difficilement par la statique et la dynamique simple, celles des états stables ou équilibrés. Par exemple, la théorie micro-économique a très peu à dire en ce qui concerne les rendements croissants. Le bouquin d'organisation industrielle de Tirole y consacre deux pages dans le cadre des marchés contestables pour dire que cette théorie est une généralisation de la

36. G. NICOLIS et I. PRIGOGINE, *Exploring Complexity*, San Francisco, Freeman, 1989.

37. *Ibid.*, p. 242.

38. A. MAS-COLELL, M. D. WHINSTON et J. GREEN, *Microeconomic Theory*, Oxford, Oxford University Press, 1995.

39. D. NORTH, « Structure and Performance : The Task of Economic History », *Journal of Economic Literature*, 16, 1978

concurrence de Bertrand aux marchés à rendement croissant⁴⁰. Le terme n'apparaît même pas dans l'index du livre de Mas-Colell *et al.*⁴¹. Or, les rendements croissants sont une situation où il y a des effets de rétroaction positives, autocatalytiques donc déstabilisateurs mais aussi auto-organisateurs. En effet, un effet d'entraînement sur une petite déviation aléatoire aura un effet déstabilisateur. Si des équilibres instables existent mais satisfont certaines propriétés topologiques (théorème de classification), il existe d'autres équilibres qui eux sont stables, des attracteurs qui peuvent être nombreux quoiqu'en nombre fini⁴². En cas de rendements décroissants, l'effet de rétroaction est négatif et donc stabilisateur. Pourtant les rendements croissants jouent un rôle important dans plusieurs branches de la science économique telles la théorie de la croissance endogène, du commerce international, de l'organisation industrielle, de l'économie du développement et de l'économie régionale. On ne parle pas d'effet de rétroaction positifs mais plutôt de causalité cumulative⁴³, de processus à causalité mutuelle amplifiant les déviations⁴⁴, de cercle vicieux, d'effet de seuil, de non-convexité. Ces mécanismes autocatalytiques résultent de quatre causes : coûts fixes importants, effets d'apprentissage, effets de coordination, attentes se renforçant mutuellement. Ces quatre causes sont présentes dans les industries qui sont basées sur le savoir et la technologie, les secteurs de pointe. Elles sont peu présentes dans les industries traditionnelles basées sur l'exploitation des ressources primaires où les rendements décroissants dominent⁴⁵.

L'exemple traditionnel est celui des technologies Betamax et VHS. Une fois qu'une des deux technologies a obtenu une part de marché plus grande que l'autre, cette position renforce sa compétitivité, ce qui l'amène à augmenter encore sa part de marché (effet d'entraînement). Au départ de la compétition, les parts de marché peuvent osciller de manière instable à cause de phénomènes aléatoires. Le mécanisme d'entraînement peut être si important qu'une des technologies est finalement exclue. Mais laquelle des deux technologies sera éliminée au départ est imprévisible. Les caractéristiques systémiques de la situation sont qu'il existe plusieurs points d'équilibre stable. L'une ou l'autre des technologies pourrait être gagnante (solution de coin) mais laquelle gagnera est imprévisible même en probabilités. Cette imprévisibilité ne résulte pas d'événements aléatoires auquel cas elle pourrait être déterminée en probabilités, mais plutôt de la théorie de l'indécidabilité⁴⁶. La théorie traditionnelle basée sur les rendements décroissants aurait prédit un partage de marché selon les coûts respectifs des technologies au point où les coûts marginaux

40. J. TIROLE, *The Theory of Industrial Organization*, Cambridge, MIT Press, 1989, pp. 309-310

41. A. MAS-COLELL, M. D. WHINSTON et J. GREEN, *op. cit.*

42. E. DIERKER, « Two Remarks on the Number of Equilibria in an Economy », *Econometrica*, 40, 1972 ; G. SILVERBERG, *op. cit.*

43. G. MYRDAL, *Economic Theory and Underdeveloped Regions*, Texas, Duckworth, 1957.

44. M. MARUYAMA, « The Second Cybernetics : Deviation Amplifying Mutual Causal Processes », *American Scientist*, 51, 1963.

45. W. B. ARTHUR, *op. cit.*

46. S. KAUFMAN, *At Home in the Universe*, *op. cit.*

seraient égaux, équilibre unique et efficace. Deuxièmement, l'équilibre peut être inefficace. Ce n'est pas nécessairement la meilleure technologie qui gagnera. Troisièmement, l'équilibre est irréversible. Une fois le gagnant installé, il est difficile de le déloger. Il n'y a pas de seconde chance pour la technologie perdante. Quatrièmement, la dépendance de sentier est présente c'est-à-dire que toute l'histoire compte pour expliquer qui a gagné. Le processus est non-ergodique ; il ne dépend pas seulement de ce qui s'est passé à l'étape précédente. Les économistes savent que les rendements croissants peuvent causer des équilibres multiples et inefficaces. Le marché commence par être symétrique ; il termine asymétrique. Bien que les parts de marché commencent par fluctuer au gré des événements, bientôt un ordre, une structure organisée apparaît. Une des technologies occupe la niche et exclut l'autre par compétition. Si une technologie est supérieure, ses chances de succès sont plus grandes ; elle jouit d'un avantage de sélection. La politique publique consistera donc à permettre à une technologie dominante de maintenir son avantage et non de ne rien faire comme suggéré dans la théorie des marchés contestables⁴⁷. Le moment où exercer cette politique importe. Le phénomène que nous venons de décrire n'est pas tout à fait nouveau en science économique. On en trouve des éléments dans la théorie des jeux dynamiques avec effets de rétroaction comme dans le cas du dilemme du prisonnier à horizon infini (la stratégie évolutive stable « tit for tat » d'Axelrod⁴⁸). On en trouve également dans la littérature sur les externalités de réseaux⁴⁹. Il est intéressant de voir que ces considérations s'appliquent à l'environnement lorsqu'il s'agit de substituer une technologie plus « durable » ou dans le domaine de l'écologie industrielle (gestion intégrée des déchets au niveau local)⁵⁰.

En organisation industrielle, lorsqu'il y a des effets d'externalités de réseaux et d'attentes, des équilibres multiples sont possibles. Si un groupe de consommateurs croit qu'un type d'ordinateurs dominera le marché et qu'il y a des avantages à appartenir au réseau gagnant en termes de programmes disponibles et de services, la compagnie qui bénéficie de ces attentes a intérêt à augmenter ses produits et par là augmentera sa part de marché. Ce raisonnement peut s'appliquer à la compagnie concurrente et il existe donc au moins deux équilibres qui satisfont les attentes.

Il se peut également que le consommateur valorise les consommateurs antérieurs du même produit pour bénéficier de leur expérience. Finalement, le consommateur peut souffrir de rationalité bornée et bénéficier d'une expérience d'apprentissage⁵¹.

47. J. TIROLE, *op. cit.*

48. R. AXELROD, *The Evolution of Cooperation*, Don Mills, Basic Books, 1984.

49. M. KATZ et C. SHAPIRO, « System Competition and Network Effects », *Journal of Economic Perspectives*, 8, 1994.

50. P. CRABBÉ, *Sustainable Development : Concepts, Measures, Market and Policy Failures at the Open Economy, Industry and Firm Level*, mnss. 1996.

51. T. KURAN, « Cognitive Limitations and Preference Evolution », *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, 147, 1991.

La question du choix entre ces équilibres n'est pas résolue. Une fois un équilibre choisi, cet équilibre ne peut être contesté sans pouvoir couvrir le coût minimum de passage d'un autre équilibre à celui-ci (deuxième loi de la thermodynamique reformulée par Kestin). Il y donc une résistance au changement. S'il y a effet d'apprentissage, l'activité choisie la première gagnera puisqu'elle sera choisie constamment par après. Cet argument peut être tempéré par l'introduction d'un taux d'escompte. Comme l'activité choisie n'est pas nécessairement efficace, il peut y avoir regret à un certain moment et la présence d'un taux d'escompte permettrait le changement de technologie.

Si on introduit un élément stochastique, par exemple que la technologie A est préférée par des consommateurs de type R et B par des consommateurs de type S et que S et R exercent leur choix dans un ordre séquentiel aléatoire, il pourra exister un moment où le consommateur de type R choisira la technologie B parce que cette technologie est devenue supérieure à A. Chaque fois que le consommateur de type quelconque choisit B, il confère une externalité de réseau positive aux autres consommateurs qui choisiront la même technologie. Cette externalité couplée avec des rendements croissants et des investissements quasi irréversibles permet d'expliquer la domination du marché par le clavier AZERTY⁵². Peut-on sortir de cet équilibre ? C'est difficile à moins de subventions gouvernementales comme dans le cas de compétition entre modes de transport. Par contre si l'équilibre est un équilibre de coordination, la coordination est transférable par FIAT à coût minime. Le transfert peut se faire volontairement si tous les consommateurs sont prêts à changer et si les préférences de tous les consommateurs sont connues de tous. Par contre, s'il y a incertitude sur les préférences des consommateurs, aucun changement ne pourrait se produire. Un phénomène de ce genre existe en économie du développement. Rosenstein-Rodan a argumenté que des firmes pourraient ne pas avoir avantage à investir si les autres ne le font pas. Il faut donc une coordination pour que tout le monde bénéficie de l'investissement (« big push »)⁵³. Cette ligne d'argumentation est utilisée par Hirschman dans sa théorie des chaînons et par Myrdal dans sa théorie de la causalité cumulative⁵⁴. En macro-économie, une idée analogue se présente. En période de stagnation, il n'est pas avantageux d'augmenter la capacité en cas de rendements croissants si tout le monde n'augmente pas la demande en même temps d'où nécessité d'intervention politique⁵⁵.

Pour expliquer le choix des équilibres, il faut expliquer la séquence des choix. C'est-à-dire avoir une dynamique. Ces choix dépendent du nombre

52. P. DAVID, « Clio and the Economics of QWERTY, American Economic Association », *Papers and Proceedings*, 75, 1985

53. P. N. ROSENSTEIN-RODAN, « Problems of Industrialization of Eastern and South-Eastern Europe », *Economic Journal*, 55, 1943

54. A. HIRSCHMAN, *The Strategy of Economic Development*, New Haven, Yale University Press, 1958 ; G. MYRDAL, *op. cit.*

55. M. L. WEITZMAN, « Increasing Returns and the Foundations of Unemployment Theory », *Economic Journal*, 9, 1982.

d'alternatives. Le système dépend de ses conditions initiales et de petites perturbations.

En commerce international, lorsque deux pays produisent deux biens à rendements croissants, chacun des pays se spécialisera mais lequel se spécialisera dans quel bien est imprévisible. Il y a deux équilibres dont l'efficacité est imprévisible. En économie spatiale, lorsqu'une firme bénéficie de la présence d'autres firmes, plusieurs équilibres minimisant les coûts de localisation peuvent se produire; lequel sera choisi dépendra du passé, de circonstances historiques⁵⁶.

Tout ceci s'inscrit clairement dans le courant de l'économie évolutive⁵⁷. La science économique n'a pas épuisé la théorie des systèmes complexes, loin de là. Par exemple, les écologues savent bien qu'un écosystème qui est ou bien sur-connecté ou sous-connecté est fragile et risque de s'effondrer⁵⁸. En est-il de même dans les systèmes économiques lorsqu'on étudie par exemple leur structure par l'analyse intrant-extrant. Deuxièmement, la frontière entre l'ordre et le chaos offre un certain caractère d'optimalité dans la mesure où les adaptations les plus sophistiquées se font au bord du chaos⁵⁹. Est-ce vrai des adaptations économiques également?

La première question a été étudiée par Kaufman⁶⁰. La deuxième, à notre connaissance, n'a pas été étudiée du tout. La science économique, en particulier l'économie du développement, n'a pas de théorie satisfaisante de l'évolution économique, de l'histoire économique. Cette dernière est caractérisée par un tissu mouvant de relations économiques gouvernées par le progrès technologique et l'amélioration du bien-être. Ce tissu a une structure basée sur la connectivité entre biens et services. Comment caractériser ce tissu? Comment se transforme-t-il? Existe-t-il des lois statistiques concernant ces structures et leur transformation? Kaufman utilise la théorie de l'optimisation combinatoire pour montrer que l'optimisation est sujette à rendements décroissants. Il introduit le concept de paysage d'aptitudes dans lequel l'aptitude est mesurée par l'habileté d'un agent économique à exercer une tâche, habileté qui sera mesurée par la hauteur d'un point dans l'espace des agents économiques. Ce paysage peut être irrégulier comme une chaîne de montagnes jeunes ou régulier comme des collines. La hauteur d'un point peut ne pas être indépendante de celle de ses voisins comme ce serait le cas dans une chaîne de montagnes jeunes. Considérons maintenant un cheminement adaptatif dans un tel paysage. Un tel cheminement se fera selon une règle qui permet d'identifier pour une tâche donnée les individus plus performants que celui avec lequel le cheminement commence. Il est possible de montrer que ce

56. P. KRUGMAN, « Scale Economies, Scale Differentiation and the Pattern of Trade », *American Economic Review*, 70, 1980.

57. R. NELSON, « Recent Evolutionary Theorizing About Economic Change », *Journal of Economic Literature*, 33, 1995.

58. S. E. JOERGENSEN, *op. cit.*

59. R. RUTHEN, « Adapting to Complexity », *Scientific American*, janvier 1993.

60. S. KAUFMAN, « The Evolution... », *op. cit.*

cheminement est sujet à rendements décroissants lorsque les paysages sont non-corrélés et que le temps d'attente pour trouver des aptitudes supérieures augmente lorsque les paysages sont corrélés. Dans ce dernier cas, il est d'abord avantageux de chercher des aptitudes de loin supérieures, loin du point de départ, parce que l'amélioration peut être importante. Lorsque ces candidats éloignés se raréfient, progressivement la corrélation devient un avantage à exploiter bien que la supériorité des aptitudes à trouver soit moindre. Ce phénomène est analogue à la saturation des effets d'apprentissage en technologie ; cette saturation explique que plusieurs technologies concurrentes puissent se partager le marché. En effet, bien qu'une technologie A soit supérieure à une technologie B, il se peut qu'il soit avantageux, à partir d'un certain moment, d'investir en B à cause des effets de saturation en A, ce qui explique le partage du marché en parts inégales reflétant l'histoire de l'investissement respectif dans ces technologies concurrentes. Pour éviter ce phénomène de saturation, on peut modifier la tâche ou le produit légèrement, ce qui amènera une déformation du paysage. Donc la susceptibilité d'un produit à la différenciation est une propriété importante de ce produit. Lorsque le produit est complexe et fait partie d'un tissu de produits, le faible nombre d'interactions avec d'autres produits peut être avantageux pour préserver la morphologie du paysage. En effet, lorsque le nombre d'interactions augmente proportionnellement avec le nombre d'autres produits, l'optimisation n'est pas supérieure à un schéma aléatoire. Par contre, dans le cas inverse où les interactions sont rares, l'aptitude augmente quoiqu'asymptotiquement peut-être. En économie, ce raisonnement peut s'appliquer aux firmes qui sont également des entités complexes formées de composantes. Un agent économique vit dans une niche définie par son environnement et par les autres agents avec lesquels il interagit. Les aptitudes de ces agents et par conséquent les paysages s'altèrent mutuellement ; ils coévoluent. Certains produits augmentent de valeur tandis que d'autres diminuent. De nouveau, la faiblesse des interactions est favorable à l'obtention de bons paysages. Chaque nouvelle innovation doit s'intégrer dans un tout cohérent. Plus le tout est complexe, plus le tissu économique possible est autocatalytique. Ceci dépendra de la multiplicité des usages d'un nouveau produit et du nombre de produits existants qui peuvent être recombinaés en nouveaux produits et services⁶¹.

Un réseau non-linéaire adaptatif appliqué à une économie permet un grand nombre d'interactions non-linéaires entre agents économiques⁶². Ces interactions sont caractérisées par une rationalité bornée, par adaptation ou apprentissage et par des rendements croissants. Les mathématiques requises par l'analyse sont combinatoires et couplées à la simulation. Ces méthodes mettent l'accent sur la découverte de blocs de construction et sur l'émergence de structures résultant de la recombinaison et de l'interaction entre ces derniers au fur et à mesure que le système accumule de l'expérience c'est-à-

61. *Ibid.*

62. J. H. HOLLAND, « The Global Economy as an Adaptive Process », dans P. W. ANDERSON, K. J. ARROW et D. PINES, dir., *op. cit.*

dire adapte. De nombreuses niches peuvent être exploitées par de nombreuses adaptations et le progrès technologique crée de nouvelles niches qui, une fois remplies, créent de nouvelles niches à leur tour. Pour cette raison, l'économie opère loin d'un attracteur global ou optimum. Un réseau non-linéaire adaptatif ne réagit pas selon un processus stimulus-réponse mais en termes d'anticipation. Les agents économiques participant au réseau forment des modèles internes au moyen desquels ils font des prédictions. Lorsque ces modèles sont prescriptifs, ils ressemblent aux stratégies de la théorie des jeux. Ces prescriptions sont des procédures opératoires normalisées qui dictent l'action dans des conditions déterminées de compétition ou de coordination. Ces procédures sont imparfaites (elles sont des quasi-homomorphismes) mais sont raffinées progressivement par l'expérience accumulée modélisée par un processus Markovien. L'outil est un algorithme génétique qui génère de nouvelles règles sur la base de l'expérience en recombinaison des blocs de construction qui sont les composantes de règles qui ont relativement réussi⁶³.

Ces modèles d'apprentissage adaptatifs ont été développés en biologie pour essayer de comprendre l'évolution sous l'effet de la sélection naturelle. Leur application au progrès technologique est évidente mais n'a pas encore produit de résultats importants. La science économique a peu contribué à l'analyse du progrès technique malgré le fait que ce dernier est le facteur le plus important de la croissance économique par tête⁶⁴.

Pour obtenir une dynamique complexe dans les systèmes économiques, Brock suggère les ingrédients suivants⁶⁵ :

- 1) agents économiques dotés d'un taux d'escompte élevé ;
- 2) rendements croissants et externalités ;
- 3) marchés incomplets ;
- 4) abandon de l'hypothèse de prix paramétrique ;
- 5) abandon de l'hypothèse de stationnarité ou de récursivité des préférences et de la technologie ;
- 6) abandon de l'hypothèse d'équilibre ;
- 7) introduction de fonctions de forçage exogènes sur la population ou le progrès technologique.

Perroux, qui s'intéressait beaucoup aux questions de compétition et de coopération comme le rappelle le grand mathématicien André Lichnérowicz dans sa préface à l'ouvrage de Perroux, « Unités actives et mathématiques nouvelles », s'intéressait aux effets d'influence, d'entraînement, de dominance

63. *Ibid.*

64. K. J. ARROW, « Workshop on the Economy as an Evolving Complex System: Summary », dans P. W. ANDERSON, K. J. ARROW et D. PINES, dir., *op. cit.*

65. W. A. BROCK, « Non-Linearity and Complex Dynamics in Economics and Finance », dans P. W. ANDERSON, K. J. ARROW et D. PINES, dir., *op. cit.*

et d'absorption dans un contexte structuraliste⁶⁶. Perroux cite dans cet ouvrage cette magnifique définition du concept de structure par André Piaget dans son livre « Le structuralisme » : une structure est « un système de transformation, qui compte des lois en tant que système (par opposition aux éléments), et qui se conserve ou s'enrichit par le jeu même de ses transformations, sans que celles-ci aboutissent au-dehors de ses frontières ou fassent appel à des éléments extérieurs⁶⁷ ».

Conclusion

Il existe dans une certaine littérature systémique une distinction entre systèmes « durs » et systèmes « mous »⁶⁸. Les systèmes durs sont les systèmes objectifs, matériels surtout développés par les ingénieurs, dont la méthode est d'optimiser une certaine fonction objective pour ce système. Par opposition, les systèmes mous sont des systèmes subjectifs, épistémologiques plus adaptés aux activités humaines pour lesquelles souvent l'apprentissage est préférable à l'optimisation. On mettra alors l'accent sur l'apprentissage social qui inclut à la fois la gestion adaptative dans laquelle l'accent est mis sur l'amélioration de la connaissance du système et la résolution de conflits limités entre agents. Les composantes de ces systèmes se reconnaissent par l'acronyme anglais CATWOE. C correspond aux consommateurs des services du système, A, à ses acteurs, T, aux fonctions de transformation d'intrants en extrants, W, à Weltanschauung ou contexte perceptuel et culturel ou récit, O, aux résultats (« outcomes ») et E à l'environnement physique. Il est clair que le mode de pensée en économie néo-classique est du type dur même s'il n'est pas véritablement systémique. Par contre, la politique publique surtout celle basée sur les sciences de la nature comme dans le cas des politiques environnementales a tendance à adopter l'approche « systèmes mous » dans la mesure où il est perçu que les acteurs ont des rationalités limitées, que le système est mal connu, que des redondances et incohérences sont inévitables et que choisir des solutions satisfaisantes dans un ensemble limité d'alternatives est préférable à l'optimisation. Le système lui-même devient un instrument de négociation entre acteurs⁶⁹.

Cette présentation – très orientée envers la littérature anglo-saxonne – a été stimulée à la fois par le hasard et la nécessité. Le hasard a permis la découverte, dans la librairie de l'Université George Washington à Washington, D.C. en septembre dernier, du passionnant ouvrage de Brian Arthur auquel cette présentation doit beaucoup ; la nécessité s'est imposée à titre d'économiste de passer à travers la littérature récente et moins récente (les ouvrages de Holling remontent au début des années 70) en science environnementale et en écologie systémique dans laquelle l'intérêt pour les systèmes

66. F. PERROUX, *Unités actives et mathématiques nouvelles*, Paris, Dunod, 1975.

67. *Ibid.*, p. 13 ; A. PIAGET, *Le structuralisme*, Paris, Presses Universitaires de France, 1968.

68. P. CHECKLAND et J. SCHOLÉS, *op. cit.*

69. K. N. LEE, *Compass and Gyroscope*, Island Press, 1992.

complexes est très développé. C'est par le biais de l'agriculture et de la foresterie que la physique de Newton a pénétré dans la science économique ; ce sera peut-être par le biais de la science environnementale que la physique de Prigogine pénétrera dans la science économique moderne⁷⁰. La résilience de l'économie néo-classique, la plus cartésienne des sciences contemporaines, aux assauts postmodernes et son hégémonie sur les autres sciences sociales ne cessent d'étonner⁷¹.

Toutefois, si l'on en croit les travaux de Brian Arthur et ceux de Richard Day, les premiers bien plus intéressants que les seconds à mon avis, les mathématiques sous-jacentes à la complexité sont encore beaucoup plus difficiles que celles qui nous sont familières en économie néo-classique.

Comme le dit Edgar Morin : « L'ennemi de la complexité, ce n'est pas la simplicité, c'est la *mutilation*. La mutilation peut prendre la forme de conceptions unidimensionnelles ou de conceptions réductrices. La mutilation vient quand on dénie toute réalité et tout sens à ce que l'on a éliminé⁷²... »

70. P. CRABBÉ, « The Contribution of L. C. Gray to the Economic Theory of Exhaustible Natural Resources and its Roots in the History of Economic Thought », *Journal of Environmental Economics and Management*, 10, 1983

71. A. E. GARE, *op. cit.*

72. E. MORIN, « Messie, mais non », dans COLLOQUE DE CERISY, *op. cit.*