

## COMPLEXITÉ

Que la complexité soit longtemps apparue comme un concept peu digne de l'attention des scientifiques, ne surprend guère : perçue comme la caractéristique "*d'un état de chose (...) qui nous égare, nous interdit la moindre prévision, nous ôte toute possibilité de raisonner sur l'avenir*" (P. Valéry, *Regards sur le monde actuel, Oeuvres*, Pléiade, T. II, p. 1059), elle se présente en des termes bien dissuasifs devant une science qui se donne vocation de prévoir ou au moins de rendre possible les raisonnements sur l'avenir !

Le mot lui-même apparaît au XVIIIe siècle pour désigner un ensemble ou un phénomène contenant et unissant des éléments différents (*complexus* exprime à la fois les actions de contenir et d'entrelacer ou de plier), et c'est sans doute l'étrangeté de cette hétérogénéité qui suscitera longtemps le désarroi du scientifique épris de rigueur cartésienne. Comment une telle hétérogénéité pourrait-elle "*se présenter clairement et distinctement en son esprit*" (1er précepte du *Discours de la Méthode*) s'il ne peut "*la diviser (...) en autant de parcelles qu'il se pourrait*" (2e précepte) ?

S'il ne peut "*distinguer les choses les plus simples*", comment pourrait-il "*s'élever par degré à la connaissance de toutes les autres*" ? (Règles IV et V des *Règles pour la direction de l'esprit*, R. Descartes).

Certes, en tâtonnant, certaines disciplines scientifiques cherchèrent à apprivoiser "*le complexe*" sinon la complexité, en désignant sous ce nom ces êtres étranges irréductibles à une entité "simple" et pourtant suffisamment stables pour être reconnaissables, sinon connaissables.

La chimie inventa les *complexes* "*formés d'éléments différents et indépendants*", la mathématique inventa les *nombre complexes* "*qui associent nombres réels et nombres imaginaires*" et la psychologie inventa les complexes (d'Œdipe ou d'infériorité) qui popularisèrent la psychanalyse...

Mais ces *concepts valises* sont encore tenus pour des intermédiaires provisoires, crochets de fixation éventuellement utiles pour l'escalade scientifique que l'on devrait pouvoir abandonner lorsqu'on parviendra au sommet.

En appelant, au terme d'une des plus exceptionnelles des réflexions épistémologiques du XXe siècle, à "*l'idéal de complexité de la science contemporaine*", dès 1934 (*Le nouvel esprit scientifique*, p. 147), G. Bachelard allait soudainement inviter les scientifiques à transformer radicalement leur regard : hier, indigne d'attention, la complexité ne pourrait-elle devenir désormais Idéal de la science ?

"*Alors que la science d'inspiration cartésienne faisait très logiquement du complexe avec du simple, la pensée scientifique contemporaine essaie de lire le complexe réel sous l'apparence simple fournie par les phénomènes compensés*" (*Le Nouvel Esprit scientifique*, p. 143).

Cette invitation ne fut sans doute pas entendue très volontiers sur le champ, malgré la variété des exemples et la richesse des arguments du "*Nouvel Esprit scientifique*". Aujourd'hui encore, nombreuses sont les institutions scientifiques qui affectent de

l'ignorer. Mais le message circule suffisamment de par le monde pour que cinquante ans plus tard, on puisse légitimement parler de "*Sciences de la complexité*". C'est en 1984 que se tient le premier colloque de l'Université des Nations Unies sur le thème "*Science et pratique de la complexité*" (à Montpellier, en France, *Actes* en français sous ce titre à la Documentation Française, 1986), et que se constitue aux USA "l'Institut d'étude des Sciences de la Complexité" de Santa Fé, Nouveau Mexique (qui publiera en 1989 les premières *Conférences en sciences de la complexité*, D.L. Stein, ed., Addison Wesley). Un rapide survol de ces cinquante premières années de la formation effective de "l'idéal de complexité" dans la science contemporaine, permettra de mettre en valeur la complexité ou le caractère polyphonique de son développement épistémologique et pragmatique, développement dont on proposera ensuite un portrait d'étape.

## "L'IDÉAL DE COMPLEXITÉ DE LA SCIENCE" : LES CINQUANTE PREMIÈRES ANNÉES.

Si les premiers textes publiés relégitimant le statut épistémologique et scientifique de la complexité peuvent être datés de 1934, l'appropriation effective par la communauté scientifique de ce concept tenu pour incongru depuis trois siècles (*Le Discours de la Méthode* paraît en 1637) ne se manifesterait qu'à partir de 1948.

L'article "*Science et Complexity*" de W. Weaver (publié dans *American Scientist*, vol. 36, p. 536-544) est considéré comme le coup d'envoi du paradigme des *Sciences de la Complexité* telles qu'elles se développent depuis cinquante ans. Méditant sur la formation de la politique scientifique au sortir de la dernière guerre mondiale, W. Weaver (alors Directeur de la Rockefeller Foundation, New York) s'interroge sur les fonctions et les responsabilités de la science dans "*le développement de l'avenir de l'humanité*", fonctions qu'il s'efforce de mettre en perspective en interprétant la chronique des transformations paradigmatiques de la science moderne, du XVII<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle. Ni W. Weaver ni G. Bachelard n'utilisaient l'expression *paradigme scientifique*, qui n'apparaîtra qu'en 1963, sous la plume de T.S. Kuhn, dans la "*Structure des révolutions scientifiques*", l'expression *paradigme de la complexité* ne se stabilisant qu'en 1977 et 1986 par les premiers tomes de "*La Méthode*" d'E. Morin. Mais c'est bien à ce concept qu'ils se référaient : G. Bachelard intitulerait le chapitre dans lequel il introduit *l'idéal de complexité de la science contemporaine* : "*Pour une épistémologie non cartésienne*", et W. Weaver proposera en 1948 de lire cette histoire de la science moderne en y reconnaissant les émergences successives de trois paradigmes :

- **Le paradigme de la simplicité** se développe de 1600 (Galilée, Descartes...) à 1800 (Condorcet, Lavoisier, Laplace...). Les modèles de la mécanique physique (ou classique ou rationnelle...) se stabilisent et deviennent durablement les modèles de référence de tout savoir scientifique : objectif, causaliste, quantitatif ... et certain.

- **Le paradigme de la complexité désorganisée** se forme à partir de 1850 avec le développement de la thermodynamique et de la cinétique chimique (Carnot, Clausius, Boltzmann). Les modèles de la mécanique statistique et de la théorie des probabilités vont permettre la formation de savoirs dans les champs de la biologie, de l'agronomie, de l'économie et bientôt de la physique quantique.

- **Le paradigme de la complexité organisée** émerge à la fin des années 40, assure W. Weaver, sous la pression des "nouveaux problèmes" (biologiques, médicaux,

psychologiques, économiques, politiques...) que les sociétés contemporaines posent à la science "lui imposant cette troisième grande avance" ; trop compliqués pour être appréhendables par les modèles de *la mécanique rationnelle* et pas assez désordonnés pour être interprétés par les modèles de *la mécanique statistique*, ce type de problèmes que la société pose désormais à la science requiert des savoirs qui privilégient la variété et l'hétérogénéité des facteurs à considérer et leurs interactions spatiales et surtout temporelles. Les méthodes linéaires et causalistes ("*les longues chaînes de raison toutes simples dont les géomètres ont coutume de se servir*", 3<sup>e</sup> précepte du "*Discours de la Méthode*") ne permettent pas de les aborder, ni au niveau microscopique par la mécanique rationnelle, ni au niveau macroscopique par la mécanique statistique. L'émergence d'un nouveau paradigme scientifique permettant de "*traiter simultanément un grand nombre de facteurs interreliés au sein d'un tout organisé*" était sans doute à peine "visible" en 1947-48, lorsque W. Weaver l'annonça en montrant sa nécessité et son urgence plutôt qu'en l'illustrant par quelques contributions scientifiques convaincantes. Son mérite sera grand d'avoir su l'anticiper par une réflexion éthique et politique et d'avoir reconnu en deux disciplines alors très embryonnaires, les prémices observables de sa thèse : nous les appelons aujourd'hui *l'informatique* et *la recherche opérationnelle* (il parlait des "nouveaux types de machines computantes électroniques" et de "l'analyse des opérations par des équipes multi-disciplinaires").

En 1947-48, W. Weaver était lui-même très impliqué dans les premiers développements de la "*théorie mathématique de la communication*" formalisée peu avant par C. Shannon et popularisée peu après sous le nom de "*théorie de l'information de Shannon et Weaver*" (1948). En même temps, il était concerné au premier chef (du fait de ses responsabilités à la Fondation Rockefeller) par les premiers pas de la *cybernétique* qui naissait de la collaboration du mathématicien N. Wiener, du neurophysiologue mexicain A. Rosenbluth et de l'ingénieur électronicien J. Bigelow, et qui allait se développer intensément par la série des désormais célèbres "*Conférences Macy*". C'est sans doute pour cela qu'il ne mentionne pas explicitement la théorie de l'information et la cybernétique dans son texte (ces désignations n'apparurent que peu après : on parlait alors de "*causalité circulaire et de mécanismes de feed-back dans les systèmes biologiques et sociaux*" !), nouvelles disciplines qui, étroitement reliées à l'informatique et à la recherche opérationnelle, allaient donner à la science un aspect épistémologique très nouveau à partir des années cinquante. Par leur conjonction, le *paradigme annoncé* de la complexité organisée allait devenir en quelques années un *paradigme observé* s'inscrivant durablement dans les discours des communautés scientifiques de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Ce *paradigme de la complexité organisée*, en s'institutionnalisant progressivement dans les cultures scientifiques, donnait sens au *manifeste* de G. Bachelard sur "*le Nouvel Esprit scientifique*" en rendant visible "*l'idéal de complexité de la science contemporaine*" par un détour que l'on ne pouvait sans doute pas anticiper avant la deuxième guerre mondiale, celui des nouvelles sciences de l'artificiel, sciences des systèmes, se construisant en *quelques projets délibérés de connaissance* et non plus sur un *objet donné par la Nature* et s'imposant au scientifique. Détour dont G. Bachelard avait pourtant eu le pressentiment en introduisant "*Le Nouvel Esprit scientifique*" : "*La méditation de l'objet par le sujet prend toujours la forme du projet*" (p. 15).

En 1950, lorsque paraît l'article "*Science et Complexité*" de W. Weaver, accompagné de ces quelques nouvelles sciences qui légitiment pragmatiquement le paradigme de la

complexité organisée, cet "*idéal de complexité de la science contemporaine*" est perçu comme un idéal local, qui ne saurait concerner toute la science. L'idée même d'un idéal de complexité n'est pas volontiers entendue par les institutions scientifiques, et le "*concept épistémologique de simplicité*" (rappelé par K. Popper dans un chapitre de "*La logique de la découverte scientifique*" dès 1935 et popularisé par ses premières éditions en anglais en 1959) est considéré comme étant "*d'une importance capitale*". Avant tout, soulignera K. Popper, notre théorie explique *pourquoi la simplicité est tellement désirable*" (p. 143, italiques de K. Popper).

Le paradigme de la complexité et les sciences de la complexité ne se constitueront dans la forme où nous les connaissons aujourd'hui qu'à partir des années 1975-1985 (on parlera alors du *paradigme de la complexité organisante*), lorsque le ressourcement épistémologique qu'ils appelaient et qu'ils nécessitaient, parviendra à se manifester au terme de quatre décennies de maturation dissimulée sous le voile longtemps tenu pour rassurant du *positivisme logique* et de ses multiples variantes. C'est en pragmatiste et non en épistémologue que W. Weaver relégitime en 1948 le concept de complexité dans la science, et rares seront les scientifiques et les épistémologues qui s'interrogeront entre 1945 et 1975 sur le statut et la légitimité des nouvelles sciences qui vont se constituer et se développer en se référant au *paradigme de la complexité organisée*.

Ces quarante années de relative inattention épistémologique handicaperont sans doute le développement immédiat des *nouvelles sciences* que l'on présentera souvent sous le label des *sciences des systèmes*, mais elles connaîtront une sorte de bouillonnement créatif qui contribuera à transformer en profondeur les conventions régissant les rapports complexes de la science et de la société, modifiant ainsi progressivement la conception de la politique scientifique dans les sociétés démocratiques.

On peut évoquer succinctement ce bouillonnement d'abord pragmatique, puis peu à peu plus épistémologique, en mentionnant quelques-uns des repères qui semblent aujourd'hui les plus saillants dans le récit de cette reconnaissance de "*l'idéal de complexité de la science contemporaine*".

Si le mathématicien N. Wiener, accompagné de A. Rosenblueth et J. Bigelow, en proposant entre 1943 et 1948 d'instituer une nouvelle discipline qu'il proposa d'appeler *la cybernétique, science de la communication et de la commande dans les systèmes naturels et les systèmes artificiels*, eut manifestement l'intuition forte de la "*révolution spirituelle que nécessite l'invention scientifique*" (G. Bachelard, 1938, p.16) ou de "*la Révolution scientifique*" (T.S. Kuhn, 1963) qu'il allait ainsi susciter (son désormais célèbre article de 1943 "*Comportement, intention et téléologie*", *Philosophy of science*, 10, p. 18-24, en témoigne), il ne semble pas que cette prise de conscience épistémologique ait été largement partagée par les éminents scientifiques qui s'associaient initialement à ce projet. La réputation scientifique incontestée des animateurs principaux des dix *Conférences Macy*, (réunies explicitement sous l'intitulé de *la cybernétique* à partir de 1949, à l'initiative d'H. Von Foerster qui venait de rejoindre ce groupe d'une trentaine de participants, parmi lesquels les mathématiciens N. Wiener, J. Von Neumann et L. Savage, le bio-neurologue W. Mac Culloch, les anthropologues G. Bateson et M. Mead, le psychologue K. Lewin,... etc.) suffisait sans doute à rassurer les institutions scientifiques quant à la légitimité épistémologique de cette entreprise étonnante. La cybernétique s'est développée dans le premier berceau effectivement *interdisciplinaire* qu'ait connu la science moderne. Les *Conférences Macy*

n'eurent d'ailleurs pas en leur temps une grande notoriété ; ce n'est qu'à partir de 1980, alors que la *première cybernétique* n'apparaissait plus que comme le premier étage presque oublié d'une fusée qui portait les sciences des systèmes, de l'information, de la computation et de la cognition, que les méditations épistémologiques requises par ces *nouvelles sciences de la complexité* incitèrent les chercheurs à remonter aux sources et à s'intéresser à la genèse de ce nouveau paradigme. On n'y trouve que peu de traces d'une réflexion épistémologique délibérée, le mot *cybernétique* lui-même ayant été retenu pragmatiquement, semble-t-il, pour éviter les conflits que suscitait le mot *téléologique* initialement proposé par N. Wiener, et contesté par J. Von Neumann.

L'appel épistémologique de G. Bachelard à *l'idéal de complexité de la science contemporaine* n'était pas encore reçu quinze ans après dans les communautés scientifiques anglo-saxonnes. C'est sans doute ce qui explique pour une bonne part l'essoufflement relativement rapide de la première cybernétique. Mais ces premières années 1946-1953 allaient en quelque sorte "crédibiliser" les autres initiatives se développant au sein du *paradigme de la complexité organisée*, leur apportant dans les années cinquante ce surcroît de notoriété dont ont besoin les innovateurs. C. Shannon développant *la théorie de la communication*, A. Turing développant *la théorie de la computation*, R. Ashby développant les théories de *la régulation intelligente* et de "la variété requise", H.A. Simon et A. Newell développant *la théorie de l'intelligence artificielle* et les *nouvelles sciences de l'ingénierie* ou L. Von Bertalanffy développant *la théorie du système général*. Et surtout, deux des "anciens" des Conférences Macy, le bio-informaticien H. Von Foerster et l'anthropologue G. Bateson, qui vont reprendre explicitement le flambeau de la "*complexité organisée*", en développant les premières *théories de l'auto-organisation* (H. Von Foerster, 1959) et de *l'écologie de l'esprit* (G. Bateson, 1963).

Sur ces matériaux, qui s'accumulent en s'internationalisant jusque vers 1980, vont se déployer les principales branches du paradigme de la complexité organisée que l'on peut reconnaître à la fin du XXe siècle. Elles semblent issues des paradigmes fondateurs que reconnaissait W. Weaver :

(a) *le paradigme réductionniste de la simplicité* s'étant "compliqué" plutôt que complexifié dans le développement des *théories de la complexité computationnelle* et des *réseaux d'automates programmables*,

(b) *le paradigme holiste de la complexité désorganisée* s'étant "ordonné" plutôt que complexifié dans le développement des *théories du chaos déterministe* et de la *dynamique des systèmes non linéaires*,

(c) *le paradigme systémique (ou interactionniste) de la complexité organisée* se constituant à l'interface des deux premiers dans les années 70, (lorsque la modélisation systémique se formait en "ouvrant" la modélisation cybernétique, contrainte par son postulat de "fermeture"), allait permettre la conjonction des *théories de l'organisation programmable et bouclante* (a), et des *théories de l'information neg-entropique* (b), conjonction qui conduira aux *théories de l'auto-adaptation et de l'auto-poïèse* (H. Maturana et F. Varela, 1975), qui vont transformer l'étude des processus évolutifs naturels, cognitifs et sociaux, concernant ainsi rapidement toutes les disciplines tant anciennes que nouvelles (écologie, immunologie, météorologie, géo-physiologie...).

Le développement de concepts modélisateurs alors originaux, tels que ceux de *la théorie des catastrophes et de la morphogénèse structurelle* (R. Thom, 1972), ceux de *la théorie des champs fractals et multifractals* (B. Mandelbrot, 1982), ceux de *la théorie des bifurcations et des structures dissipatives* (I. Prigogine et G. Nicolis, 1977), *la théorie des états critiques* (P. Bale, 1985), *la théorie du chaos déterministe* (D. Ruelle, 1991), *la théorie de la complexité algorithmique ou computationnelle* (A. Kolmogorov, 1965 et G.J. Chaitin, 1987), va provoquer l'essor des méthodes de simulations informatiques comme outils d'investigation.

Les modèles de *réseaux neuronaux* (Hopfield, 1982) ou les *algorithmes génétiques* (J.M. Holland, 1975) vont permettre de "réaliser" des *automates cellulaires auto-reproducteurs et auto-adaptatifs*. *De nouveaux modes d'expérimentation* apparaissent ainsi, suggérant des interprétations plausibles de phénomènes que l'on tenait jusqu'alors pour inintelligibles... ou trop complexes pour être explicables : les travaux récents sur *la vie artificielle* (C.G. Langton, 1989), *l'intelligence collective* (Bonabeau et Teraulaz, 1995), *l'apprentissage* (G. Clergue)... en proposent quelques illustrations.

## L'ÉMERGENCE DU PARADIGME DE "LA COMPLEXITÉ ORGANISANTE".

Cette étonnante effervescence scientifique des années 1945-1975 qu'annonçait l'article "Science et complexité" de W. Weaver, semble s'être longtemps développée sans accorder beaucoup d'attention à sa propre légitimité épistémologique. Perçues comme marginales et ancillaires par les institutions scientifiques, ces *nouvelles sciences* se présentent sans contester les *conventions épistémologiques* alors généralement acceptées, sous l'ombre tutélaire desquelles elles assurent se placer. Elles veillent d'ailleurs à ne pas provoquer l'Institution en ne se référant que rarement de façon explicite au concept de complexité. La bibliographie consacrée aux *systèmes complexes* par J.V. Cornacchio en 1977, compte à peine une centaine d'entrées (IJGS, 3, p. 267-271), alors que la bibliographie consacrée à *la recherche sur les systèmes en général*, éditée la même année par G. Klir et Al (U.C. Binghamton, 1977) compte plus de 1 400 entrées, pour la même période 1945-1976 (l'édition suivante, qui couvre la période 1977-1984 compte plus de 2 000 entrées). Certes, ces références sont principalement anglo-saxonnes, mais il ne semble pas qu'avant 1975, les autres continents aient été très attentifs aux développements du paradigme et des nouvelles sciences de la complexité. Peut-être était-ce dû, au moins pour une part, à la dubitation que suscitait alors en Europe le pragmatisme exacerbé des pionniers nord-américains des nouvelles sciences de la complexité ?

Comment prendre au sérieux ces chercheurs qui affectent de ne pas s'interroger sur le sens et la légitimité épistémique de ce qu'ils font, s'attachant d'abord à l'efficacité apparente des "résultats" ? Il est vrai que les chercheurs européens eux aussi ignoraient pour la plupart l'appel à "*l'idéal de complexité de la science contemporaine*" lancé par G. Bachelard en 1934. Le célèbre biologiste français J. Monod (qui avait su s'approprier dès 1960 les concepts de modélisation cybernétique pour développer, avec F. Jacob et A. Lwoff les nouvelles thèses de la biologie moléculaire qui allaient leur valoir le prix Nobel en 1964) ne préfaçait-il pas en 1973 la traduction française de *La logique de la découverte scientifique* de K. Popper (publiée initialement en allemand en 1935) sans s'apercevoir que ce texte de référence du *concept épistémologique de simplicité* (p. 13) était contemporain du *Nouvel Esprit scientifique* de Bachelard (1934), tout en moquant cette "*sociologie fermée de la philosophie française qui ne semble (...) ouverte (...)*"

qu'aux plus obscures extravagances de la métaphysique allemande" (K. Popper, 1973, p. 1).

Sans doute G. Canguilhem avait-il fait traduire et publier dans *Les Études philosophiques*, vol. 16, n° 2, le texte de l'article de N. Wiener, A. Rosenblueth et J. Bigelow de 1943 sous le titre "*Comportement, Intention et Téléologie*", en attirant l'attention des épistémologues francophones sur "*l'intérêt singulier de ces notions que rencontreront cybernéticiens et philosophes*". Mais il ne semble pas que cette annonce d'une *révolution scientifique* qui restaurait la *téléologie, science des processus de finalisation* dans les cultures scientifiques, ait à l'époque été perçue comme un événement épistémologique notable. C'est à J. Piaget que revient le mérite d'avoir tenté le premier de relever le défi épistémologique que la cybernétique posait à la science. Il demanda au cybernéticien américain S. Papert de rédiger la première étude dont on trouve trace aujourd'hui sur *l'épistémologie de la cybernétique*, étude qu'il inséra dans la célèbre *Encyclopédie Pléiade "Logique et Connaissance scientifique"* qu'il dirigea en 1967. Certes, lu trente ans après, ce texte sans précédent propose une argumentation que l'on trouvera légère. Mais il allait avoir le mérite de poser publiquement une question jusqu'ici tenue pour incongrue et il ouvrait en quelque sorte la boîte de Pandore : dix ans plus tard, l'épistémologie (des sciences) de la complexité devenait une question légitime et surtout suscitait nombre de réflexions et de recherches qui vont non seulement transformer le paradigme de la complexité organisée, mais aussi affecter les méditations épistémologiques de toutes les disciplines scientifiques, qu'elles se réfèrent ou non à "*l'idéal de complexité de la science*".

On peut citer quelques textes aujourd'hui classiques. En 1969, H.A. Simon publie "*The Sciences of the Artificial*" qu'il ordonne autour de son dernier chapitre : "L'architecture de la complexité" (initialement publié en 1962). En 1973, E. Morin publie : "*Le Paradigme perdu : la nature humaine*", qui va introduire les tomes successifs de *La Méthode* (le tome I : *La Nature de la nature* en 1977, le tome II : *La Vie de la vie* en 1980). En 1973 paraissent aussi les *Cahiers* de P. Valéry (édités par J. Robinson, coll. Pléiade) édition qui va permettre d'accéder à une des méditations épistémologiques les plus riches du XXe siècle. En 1979 paraissent "*Entre Le Cristal et la fumée, essai sur l'organisation du vivant*", d'H. Atlan, "*La Nouvelle Alliance*" d'I. Prigogine et I. Stengers, "*Le Paradoxe et le système*" d'Y. Barel. En 1981 paraît "*Observing Systems*" d'H. Von Foerster (colligé par F. Varela). En 1984, "*La sfida della complessità*" ("Le Défi de la complexité"), édité par G. Bocchi et M. Ceruti, témoignera de la vitalité des réflexions sur l'épistémologie de la complexité au sein de la communauté scientifique italienne. Il faut renoncer à poursuivre ici l'énumération de ces matériaux, dont la liste s'allonge de façon impressionnante depuis quinze ans, sans que l'on puisse encore distinguer aisément les réflexions effectivement innovantes des multiples tentatives locales.

L'apport de cette exceptionnelle effervescence épistémologique des années 70 au paradigme de la complexité va s'avérer assez puissant pour provoquer une sorte de second souffle dans les recherches conceptuelles et expérimentales qui vont permettre aux *sciences de la complexité* d'avoir désormais "pignon sur rue" dans les institutions scientifiques au fil des années 80, le colloque de l'U.N.U. de 1984 : *Science et pratique de la complexité* donnant symboliquement acte de cette légitimation scientifique. Elle va incidemment contribuer à relancer les questionnements et les remises en question des

paradigmes épistémologiques de référence (post-positivisme, réalisme, rationalisme critique...) qui semblaient stagner dans les cultures scientifiques en s'installant dans les académies ("science égale ordre et progrès!").

On peut camper les traits aujourd'hui les plus saillants de ce questionnement épistémologique, s'interrogeant sur la légitimation des énoncés enseignables que produisent ces nouvelles sciences (et sans doute aussi, par là-même, les anciennes) en soulignant quelques-uns des arguments les plus fréquemment évoqués (évoqués mais parfois discutés sur le mode des querelles des anciens et des modernes, ici des positivistes-et-réalistes appréhendant les constructivistes). Ou, pour reprendre une distinction proposée dès 1934 par G. Bachelard, une discussion entre les tenants des épistémologies cartésiennes et ceux des *épistémologies non cartésiennes* ; non cartésien ne devant pas être entendu comme "anti-cartésien" mais comme "différent" : des épistémologies se développant sur d'autres hypothèses fondatrices que celles du dualisme sujet-objet et de l'objectivisme, du réductionnisme, du causalisme efficient et linéaire, du déductivisme et de la complétude, auxquelles se réfèrent les épistémologies cartésiennes dans leurs variantes réalistes et positivistes.

Ces traits saillants - ou ces hypothèses épistémologiques "différentes" - peuvent aujourd'hui être présentées comme les caractéristiques du paradigme (des sciences) de la complexité tel qu'on peut le reconnaître à la fin du XXe siècle.

Puisque l'on s'est aidé du modèle de la genèse des sciences de la complexité en trois étapes, proposé en 1948 par W. Weaver pour organiser la présentation de ce déploiement progressif du paradigme de la complexité, on peut en prolonger l'interprétation en identifiant une *quatrième étape* qui deviendrait visible à partir de 1975-1980. Intégrant et assumant les développements suscités au sein du paradigme de la complexité organisée dans les domaines de *la complexité computationnelle* (complexité algorithmique, réseaux d'automates...) et de *la complexité de la dynamique des systèmes non linéaires*, le *paradigme de la complexité organisante* permet non seulement une réinterprétation épistémologique plausible des acquis, mais aussi une incitation à de nouvelles explorations suscitant de nouveaux modes d'intelligibilité des multiples complexités que perçoivent au fil du temps les humains dans leurs rapports mutuels et avec leurs univers. Ces processus cognitifs de modélisation "organisante" des phénomènes perçus complexes s'auto-caractérisent par la discussion de ces "traits saillants" que l'on peut tenir pour les quelques principes actuellement formulés de *la modélisation de la complexité* (modélisation étant à entendre ici dans son sens habituel : l'action de modéliser, ou de représenter en des termes communicables, plutôt que dans son sens restreint de "résultat" de cette action, *les modèles*).

## **LES PRINCIPES DE LA MODÉLISATION DE LA COMPLEXITÉ ORGANISANTE.**

### **LA COMPLEXITÉ, "IMPRÉVISIBILITÉ ESSENTIELLE... ET INTELLIGIBLE"**

En proposant d'entendre la complexité d'un phénomène ou d'un système par l'incertitude que l'observateur attribue à leur comportement futur, P. Valéry établissait une distinction épistémique qui allait s'avérer très importante entre *la complexité* et la

*complication*, voire *l'hyper-complication*. La complication d'un phénomène implique que l'on puisse, fût-ce au prix d'un exercice de computation très onéreux, toujours déterminer de façon tenue pour certaine, ses états ou ses comportements dans toutes les conditions que l'on envisage. Les évolutions de ce système doivent pouvoir être prédites, éventuellement sous forme probabilisée, à l'aide d'algorithmes programmables. La liste des états possibles est présumée connaissable a priori et l'on sait décrire un itinéraire ou un "programme" au moins dans cet "espace d'états" défini indépendamment de l'observateur, permettant de déterminer un état futur du phénomène, ou d'atteindre un état souhaité par ou pour ce système : une théorie (ou une loi, ou une structure invariante) *explique* le comportement du phénomène, le rendant ainsi prévisible. Les limites de *capacité computationnelle* de l'observateur compromettent parfois en pratique cette possibilité de prédiction par le calcul ou par *l'application* de la théorie, dans les situations d'hyper-complication (un calcul balistique qui demanderait plusieurs jours à une dizaine de calculateurs humains expérimentés, alors que les résultats de ce calcul doivent impérativement être disponibles dans les prochaines minutes). Mais l'invention des *machines computantes* (ou ordinateurs) allait permettre de repousser très loin ces limites, ce qu'avait auguré W. Weaver, annonçant l'âge de *la complexité organisée*.

La complexité, par contraste se définit comme la caractéristique d'une situation dans laquelle l'observateur sait a priori qu'il ne connaît de façon certaine ni la liste de tous les états possibles que le phénomène est susceptible de manifester (fût-ce de façon fugace) ni celle de tous les programmes qui permettent d'atteindre tel de ces états.

Autrement dit, le système est susceptible de manifester un comportement imprévisible pour cet observateur. Situation fréquente dans la vie quotidienne des humains, qu'ils s'intéressent à leurs relations mutuelles ou à leurs relations avec l'univers ! Mais situation qui avait longtemps découragé les scientifiques peu incités à examiner des problèmes qu'ils pensaient ne pas pouvoir *résoudre* de façon certaine (... ou "scientifique", disait-on), puisque les *solutions* ne peuvent a priori être déterminées. En invitant la science à chercher, plutôt que des explications, "*des représentations sur lesquelles on pût opérer, comme on travaille sur une carte, (...) et qui puissent servir à faire*", P. Valéry (*Cahiers*, Pléiade, 1, p. 854) proposait de modifier les termes du défi. En passant d'un objectif *d'explication* à un objectif *de compréhension ou d'intelligibilité* (pour reprendre sommairement une distinction classique établie par W. Dilthey, dans *"Introduction aux sciences de l'esprit"*, 1883), la science ne peut-elle contribuer à rendre intelligibles des comportements qui, non certainement prévisibles, peuvent s'avérer plausibles sinon probables... au moins pour les observateurs qui ont pour projet de s'y intéresser ?

En ne confondant plus l'imprévisible et l'inintelligible, et en convenant de la possible imprévisibilité des comportements observables, la science ne se met-elle pas en situation d'atteindre cet *idéal de complexité* que les humains peuvent lui proposer ?

La complexité devient alors une caractéristique phénoménologique ("imprévisibilité essentielle") plutôt qu'ontologique (enchevêtrement d'un grand nombre de composants en interaction), tout en tirant le grand bénéfice des nombreuses études développées sur cette définition initiale de la "complexité organisée".

LA COMPLEXITÉ EST-ELLE "DANS L'ESPRIT DES HOMMES OU DANS LA NATURE DES CHOSES" ?

Le paradigme de la complexité organisée impliquait une hypothèse forte sur l'indépendance de *la complexité du réel* par rapport à l'observateur : ce dernier pouvait ne pas la reconnaître, mais on devait postuler que la complexité était *dans la nature des choses* et que l'on puisse ainsi l'appréhender. Mais cette *naturalité de la complexité* dépend manifestement des modes de description et de représentation du phénomène considéré. H.A. Simon, dès 1962, dans "*l'architecture de la complexité*" a proposé un critère permettant pragmatiquement de reconnaître *les bonnes représentations* : celui d'une *quasi décomposabilité en niveaux multiples*, les interactions entre niveaux étant relativement peu nombreuses et aisément identifiables, et les interactions au sein d'un même niveau étant plus nombreuses et relativement stables au fil du temps. Thèse qu'il illustrera de nombreux exemples et qui constitue une heuristique manifestement très souvent bienvenue à l'observateur modélisateur, dès lors que ce dernier veille à représenter les interactions ou les processus, plutôt que les états ou les objets. La tentation est grande de tenir pour "vrai" (au sens de "empiriquement vérifiable pour tout observateur") le modèle d'un phénomène tenu pour complexe que l'on a organisé en niveaux anatomiques hiérarchisés, sans s'intéresser à ce que pourrait être une représentation en niveaux physiologiques ou fonctionnels, laquelle serait souvent en pratique plus pertinente (le chirurgien anatomiste est-il évidemment supérieur au clinicien physiologiste ?).

Il reste que nous ne disposons pas de critères certains permettant d'assurer que la complexité est ou n'est pas dans la nature des choses. Nous ne disposons que des représentations que nous en construisons intentionnellement et il n'est pas surprenant qu'elles puissent être multiples. Leur légitimité tiendra à leur intelligibilité et à leur communicabilité : "*Sans détruire le merveilleux, donnent-elles du sens à ce merveilleux ?*" interrogeait Simon Stevins de Bruges, que rappelle H.A. Simon en introduisant "*The Sciences of the Artificial*".

Cette réflexion sur la naturalité ou l'artificialité de la complexité perçue suscitera ainsi un profond renouvellement des conceptions et des méthodes de la modélisation (ou de l'acte modélisateur) de la complexité (ou des phénomènes perçus complexes) qui constitue un des *résultats* les plus tangibles du développement contemporain des sciences de la complexité.

#### LA COMPLEXITÉ EST CELLE DU SYSTÈME OBSERVANT : INSÉPARABILITÉ, IRRÉVERSIBILITÉ, ET RÉCURSIVITÉ.

Dès lors que nous convenons que nous n'accédons à l'intelligence de la complexité d'un phénomène que par les représentations (ou modèles, systèmes de symboles eux-mêmes perçus complexes) que nous en construisons, nous *ne pouvons plus séparer* le système modélisateur (l'esprit humain produisant des descriptions intelligibles) du phénomène modélisé (lequel n'a peut-être d'autre *réalité* que celle des représentations que l'esprit s'en construit).

Cette *observation* (E. Morin, 1977, p. 179) s'exerce nécessairement dans le Temps, temps que nous ne pouvons pas ne pas percevoir *irréversible* : le retour exact à une observation antérieure nous apparaît impossible, l'observateur sait qu'il peut modifier le phénomène observé, surtout lorsque son observation est médiatée par quelque instrument (ainsi le thermomètre modifie, par son seul contact, la température de l'objet susceptible d'être observé). Et il sait qu'il est lui-même susceptible d'être modifié par la conscience qu'il prend des résultats de son observation. "*En changeant ce qu'il connaît du monde, l'homme se change lui-même*" (T. Dobzansky, *L'Homme en évolution*,

1960). "*Nous considérer comme étrangers à la nature implique un dualisme étranger à l'aventure des sciences aussi bien qu'à la passion d'intelligibilité...*" (I. Prigogine, *La Fin des certitudes*, 1996, p.15). Cette interaction récursive fondamentale dès lors qu'elle est entendue et assumée par l'observateur, va constituer un facteur de complexité spécifique, au demeurant intelligible, qui ne permet plus au scientifique de parler d'une objectivité intrinsèque et a-temporelle. Il n'est plus certain que les mêmes causes produisent les mêmes effets à des époques et en des lieux différents. En revanche, elle va lui permettre de parler de la *projectivité* de son observation, l'incitant à expliciter le projet du modélisateur qui, dans le champ a priori infini des observables, va devoir préciser ses *intentions d'observation* pour pouvoir légitimer de façon intelligible les résultats de son observation (*On ne voit que ce que l'on veut voir*). Ce projet d'observation est lui-même actif : "*Nous ne percevons que des opérations, c'est-à-dire des actes*" (P. Valéry, *Cahiers*, Pléiade, I, p. 562), l'observation devient attention au *faire* plutôt qu'au *fait*.

H. Von Foerster ("*Observing systems*", 1981) a prêté une extrême attention à ce caractère fondamentalement *récursif* de tout exercice de modélisation d'un phénomène perçu complexe et il en a proposé une sorte de théorisation opératoire par le concept de *comportement propre* (*eigen-behaviour*) qu'il a rapproché du concept d'*équibration majorante* introduit par J. Piaget pour rendre compte de la dualité entre les processus cognitifs d'accommodation et d'assimilation sur laquelle celui-ci a développé la *théorie de la psychologie (et de l'épistémologie) génétique* : une de ses formules, souvent citée fait ici image, même si son interprétation littérale doit être faite dans son contexte : "*L'intelligence (...) organise le monde en s'organisant elle-même*" (J. Piaget, 1937, p. 347).

## COMPLEXITÉ ET TÉLÉOLOGIE : DU "PARCE QUE..." AU "AFIN DE..."

Cette citation délibérée des projets du système observant va conduire à reprendre une réflexion ancienne sur le caractère intentionnel et téléologique de l'acte modélisateur d'un système perçu complexe. Kant avait longuement argumenté ce "*principe de l'appréciation de la finalité interne dans les êtres organisés*" en soulignant qu'"*un produit de la nature est un produit dans lequel tout est fin et réciproquement aussi moyen*" (*Critique de la faculté de juger*, p. 340).

Mais il fallut attendre l'émergence du paradigme de la complexité organisée et de la cybernétique pour voir réapparaître dans la méditation épistémique ce concept qui en avait été banni pendant 150 ans (cf. le titre de l'article de N. Wiener et Al, 1943) : *La téléologie* fut d'abord confinée dans une catégorie quasi mécanique que J. Monod appela *la Téléonomie*, qui permettait de traiter des systèmes cybernétiques simples à but unique, stable et exogène (celui du régulateur thermostatique). La prise en compte progressive de la récursion du résultat sur le processeur dans la modélisation des processus perçus complexes va peu à peu susciter un renouvellement des réflexions sur la complexité de la modélisation des phénomènes modélisés entendu à la fois dans leur fonctionnement (synchronique) et dans leur transformation (diachronique). Leur capacité à endogénéiser leur propre système de finalisation et à le déployer en composantes multiples (multi-critères) en s'exerçant dans la dialectique permanente du choix des moyens pour atteindre des fins (qui entraînent l'identification de nouvelles fins possibles, lesquelles, à leur tour, suscitent l'idée de nouveaux moyens..). peut être explicitée et décrite intelligiblement en termes de procédures computables.

A partir du moment où les projets d'intelligibilité ou de **compréhension** deviennent au moins aussi admissibles que ceux d'**explication** pour les programmes de recherche scientifique, le confinement de la science dans la seule identification des causes présumées efficientes, ne s'avère plus indispensable.

Les quatre types de causes proposées par Aristote sont a priori aussi légitimes les unes que les autres. H. Von Foerster illustre cela par une formule heureuse : on peut tout aussi bien raisonner scientifiquement en termes de "parce que..." (cause efficiente) qu'en termes de "à fin de ..." (cause finale).

## COMPLEXITÉ ET REPRÉSENTATION DU CONTEXTE : SYMBOLISATION MULTI DIMENSIONNELLE.

Pour être explicites, les intentions ou les projets du système observant doivent pouvoir être (*in*)formés, mis en formes communicables et interprétables. L'invention du langage et des mille artifices de *dénotations* graphiques, picturales, musicales, chorégraphiques, numériques, iconiques, phonétiques, alphabétiques..., par l'esprit humain au fil de ses multimillénaires expériences modélisatrices, met à disposition un riche appareil de *systèmes de symboles*.

Riche mais relativement difficile à exploiter dans sa diversité, dans la mesure où les cultures ne gardent traces que d'un relativement petit nombre de projets dans leurs contextes, pour l'expression desquels ces systèmes de symboles furent inventés. On pouvait présumer que les hiéroglyphes gravés sur les tablettes des pyramides égyptiennes médiataient quelques projets dans quelques contextes, mais pouvait-on les interpréter en ignorant les uns et les autres avant que la pierre de Rosette ne permette à Champollion de nous proposer des correspondances plausibles entre le signe et le sens, faisant des hiéroglyphes des symboles permettant la dénotation et l'interprétation ? Comment exprimer une intention dans un contexte si l'on ne dispose pas *des mots adéquats pour la dire* ou *des symboles adéquats pour la dénoter* ?

A tenter d'exprimer tel nouveau projet (le vin nouveau) à l'aide des symboles anciens par lesquels s'exprimaient les anciens projets (les vieilles outres), on risque de compromettre la possibilité de les rendre effectivement exprimables. P. Valéry assurait souvent qu'il lui faudrait disposer de *Nombres plus Subtils* (qu'il notait  $N+S$ ) pour rendre compte des correspondances qu'il souhaitait exprimer. Sans l'invention des systèmes de notation musicale, peut-on espérer *communiquer l'ineffable* de tel concerto ? La chimie eût-elle pu se développer sans l'invention du système de notation chimique ?

La modélisation des systèmes perçus complexes dans leur contexte bute sans doute aujourd'hui sur le fait que l'appareil symbolique dont disposent les modélisateurs est plus adapté au projet de description des substances, ou des objets (présumés analysables ou *réductibles à leur plus simple expression*) qu'à celui de la description des actions. Dans les manuels scientifiques, les index mentionnent les substantifs plus volontiers que les verbes. L'expérience de la modélisation des complexités organisantes est encore balbutiante, se dégageant lentement du cadre contraignant pour elle de la symbolique d'une modélisation analytique (empruntée pour l'essentiel à la mathématique ensembliste classique). Les développements contemporains de *la modélisation systémique* visant à rendre compte de *l'inséparabilité* du comportement et de l'évolution ("*Le comportement, moteur de l'évolution*", J. Piaget, 1976), comme de l'inséparabilité de la téléologie et du contexte, constituent sans doute une voie ouverte à cette *ingénierie de la symbolisation* que requiert l'intelligence de *la complexité organisante*.

## COMPLEXITÉ ET RATIONALITÉ : RAISON SUFFISANTE ET RAISON DÉLIBÉRANTE.

Si *Le Discours de la Méthode* avait donné à la modélisation des phénomènes compliqués ou hyper compliqués sa symbolique de base ("*diviser les difficultés en autant de parcelles qu'il se pourrait*"), il lui avait aussi donné son mode de traitement privilégié : le raisonnement déductif linéaire ("*ces longues chaînes de raisons toutes simples et faciles dont les géomètres ont coutume de se servir*" par lesquelles on parviendra aux connaissances "*les plus cachées ou les plus éloignées*" si l'on veille "*à garder toujours l'ordre qu'il faut pour les déduire les unes des autres*" ...) Le raisonnement syllogistique parfait, devenu depuis le siècle dernier *la logique formelle*, basée fermement comme lui sur les très contraignants axiomes d'Aristote (qu'ignorent aujourd'hui trop de scientifiques qui assurent pourtant bien raisonner logiquement pour présenter les énoncés enseignables qu'ils produisent), donne à ce mode de raisonnement linéaire déductif ses lettres de noblesse scientifique et témoigne de son efficacité universelle. Depuis Leibniz "*le principe de raison (déductive) suffisante*" est d'autant plus rassurant qu'il permet de rendre compte avec certitude de "*toutes les choses qui peuvent tomber sous la connaissance des hommes*". Plutôt que de consacrer beaucoup d'énergie à la modélisation du processus, mieux vaut, pense-t-on, en établir un modèle simplifié voire simpliste ou bâclé, et se consacrer au traitement rationnel de ce modèle, par "*longues chaînes de raisons toutes simples*" jusqu'à ce qu'on aboutisse à une solution rationnellement démontrée. Cette conception de la rationalité déductive linéaire fut si prégnante qu'aujourd'hui encore elle constitue une garantie quasi certaine de rationalité.

Dès les premiers pas du paradigme de la complexité organisée, ce principe allait être subrepticement remis en question dans son monopole, par l'introduction du concept de *causalité circulaire* (sur lequel se définissait la première cybernétique) puis ultérieurement avec la formulation des modes de raisonnement récursif (H. Von Foerster, 1981 : *La cybernétique de deuxième ordre*). Un autre pas fut très vite franchi, dans les années 1955, par H.A. Simon et A. Newell introduisant le concept "*d'heuristique programmante*" (Heuristic programming), qu'ils empruntaient au mathématicien G. Polya, qui l'avait restauré en 1945 dans "*How to solve it*", puis en 1952 dans les "*Mathématiques du raisonnement plausible*". L'idée de *programmer* ce type de raisonnements dont la convergence vers un résultat certain n'est pas assurée (à la différence des raisonnements algorithmiques) sera introduite par A. Turing publiant en 1952 "*Computing Machinery and Intelligence*".

Ces divers modes de raisonnements autres que déductifs et linéaires s'avéraient pourtant judicieux, conduisant à des résultats intelligibles et pertinents dans les contextes où ils étaient mis en œuvre. On allait alors se souvenir que ces modes d'exercice de la rationalité avaient été explorés parfois depuis longtemps. La restauration par le logicien C.S. Peirce (1848-1914) des modes de *raisonnements abductifs* (privilégiant l'exploration de séquences tenues pour plausibles), comme la restauration de la "*Nouvelle rhétorique*" par C. Perelman (1971) suivie de peu par les renouvellements des *théories de l'Argumentation* et de "*La logique naturelle*" (J.B. Grize, 1983) constitueront rapidement des centres d'intérêt nouveaux pour des chercheurs en intelligence artificielle. Autant d'occasions d'expérimentation-modélisation qui se fédéreront implicitement au sein du **paradigme de la complexité organisante** en

transformant l'appareil traditionnel par trop fermé de la rationalité linéaire : il ne s'agit plus de démontrer le vrai à partir de prémices présumées vraies, mais de produire des représentations intelligibles à partir de représentations plausibles. H.A. Simon a proposé en 1977 de synthétiser ces deux formes d'exercice de la rationalité en intitulant la première : "*rationalité substantive*" (linéaire et déductive, algorithmisable) et la seconde : "*rationalité procédurale*" (tâtonnante, délibérante, heuristique).

E. Morin, en élargissant le concept de logique par celui de *dialogique* soulignera les multiples ressources du *bon usage de la raison* en associant plutôt qu'en excluant mutuellement les deux formes de logiques, celle qui privilégie le traitement formel : logique formelle, déductive, "explicative", et celle qui privilégie les "*logiques des significations*" (J. Piaget et R. Garcia, 1987) : logique dialectique, logique naturelle, "compréhensive" et téléologique.

"C'est quand nous ne pouvons imaginer un but - même très lointain - que nous concluons à l'incohérence" dira P. Valéry (*Cahiers* 94-14, T.VI, p. 86), qui conclura fort... logiquement que "*l'incohérence (ainsi entendue) est le moyen de l'imagination*", une rationalité qui cherche à *produire du sens* plutôt qu'à *vérifier des identités formelles*.

En retenant l'observation d'H.A. Simon soulignant que c'était le type de rationalité que l'on observait aisément dans l'exercice des *délibérations*, on peut proposer ce qualificatif faisant image pour caractériser les formes de rationalité que le développement du paradigme de la complexité incite à exercer dans les sciences contemporaines. Le *Principe de raison délibérante* ouvrant à la modélisation des phénomènes perçus complexes, un champ que le *Principe de raison suffisante* avait sans doute trop restreint à l'examen des modèles des phénomènes compliqués. Mais peut-être retiendra-t-on la désignation proposée par Aristote et exploitée par Hegel de *raison dialectique* pour rendre compte de cette ouverture de "la pensée complexe".

## LA COMPLEXITÉ ORGANISANTE : AUTO-ÉCO-RÉ-ORGANISATION.

En mobilisant les concepts d'incertitude, d'inséparabilité, d'irréversibilité, de récursivité, de téléologie, de symbolisation et de rationalité délibérante ou dialectique, que la *science positive* avait délaissés ou ignorés, le paradigme de la complexité organisée et organisante (organisée afin d'être organisante ?) va retrouver, pour les entendre dans leur unité et leur multiplicité, *unitas multiplex*, les deux appareils cognitifs conjoints forgés depuis longtemps par la pensée humaine, celui de *système*, qui s'était "réduit" depuis deux siècles à celui de *système fermé* (ou *d'ensemble*) et celui d'*organisation*, qui s'était réduit à celui de *structure* (ou d'ordre stable). Les premiers développements du paradigme de la complexité organisée susciteront un premier décapage de la notion de système (dont témoigne le développement de "*La Théorie du système général*", L. Von Bertalanffy, 1968), théorie qui par son incomplétude même allait contribuer à accélérer la maturation du paradigme de la complexité organisante, accompagnant, en coévolution, le déploiement d'une théorie renouvelée de l'organisation dont les deux premiers tomes de "*La Méthode*" d'Edgar Morin (1977, 1980) donneront l'architecture et poseront les fondements épistémiques (fondements qui manquaient manifestement tant à la première cybernétique, N. Wiener, qu'à la première systémique, L. Von Bertalanffy, avant 1975).

Le paradigme de l'organisation complexe (anthropo-bio-cosmique) qu'E. Morin propose de mettre en forme, va en effet permettre de présenter en une "*unitas multiplex*" les diverses conceptions de la complexité que développaient progressivement toutes les disciplines depuis l'appel de W. Weaver : la biologie (H. Quastler, F. Jacob, H. Atlan...) et les sciences du comportement, psychologie génétique et théorie de l'équilibration (J. Piaget), et la neuropsychologie (W. Mac Culloch, H. Maturana, F. Varela, qui introduiront les théories de l'autopoïèse) ; la physique quantique et la thermodynamique (I. Prigogine, H. Gell-Mann, M. Mugur-Schächter) ainsi que la dynamique des systèmes non linéaires et les théories du chaos (D. Ruelle) ; les nouvelles sciences de l'ingénierie : cybernétique (N. Wiener), théories de la computation (A. Turing, H. Von Foerster), théorie de la communication (C. Shannon et W. Weaver), intelligence artificielle et sciences de la cognition (H.A. Simon et A. Newell...) ; et les "nouvelles sciences naturelles", de l'écologie à la géophysologie (P. Westbroeck) ou "les nouvelles sciences de la société", de la pragmatique à la socioéconomie évolutionniste...

Dans ce creuset épistémologique, les concepts vont progressivement s'articuler en quelques dualités, dont les pôles permettront de repérer les tensions constitutives d'un paradigme de la complexité qui les reliera... et les transformera... sans les rejeter : les dualités ordre-désordre, tout-partie, nécessaire-possible, différenciation-coordination, diversification-sélection, autonomie-solidarité, assimilation-accommodation, transaction-rétroaction (ou action transitive et action récursive), singularité-régularité, processus-résultat...

Ainsi va se former une boucle épistémique associant la formation des connaissances *organisées* (les sciences) et celle des connaissances *organisantes* ("*La critique épistémologique interne*" disait J. Piaget), boucle qui ne nécessite plus le postulat d'un "*métaniveau suprême (ou inviolable)*" donnant "*le dernier mot*" à la métaphysique (J.P. Dupuy, *Ordres et désordres*, 1982, p. 211-251) : "*Toute connaissance acquise sur la connaissance devient un moyen de connaissance éclairant la connaissance qui a permis de l'acquérir*". (E. Morin, *La Méthode*, T. III, 1980, p. 232).

Peut-on condenser en un *génotype initial* le noyau de formation de ce paradigme de l'organisation entendue dans et par sa complexité, complexité dont elle permet récursivement l'intelligibilité ? Ce serait par une formule du type : *l'information forme l'organisation qui la forme*. Thermodynamique, cybernétique, biologie, ont souvent été tentées d'explicitier cette correspondance complexe.

J. Von Neumann suggérait même de "*retenir le terme de complexité pour rendre compte de la grandeur que Shannon avait désignée sous le nom d'information*" rappelle A. Molès dans sa préface à la traduction française de *La Théorie mathématique de la communication* de C. Shannon et W. Weaver en 1975, p. 23.

En proposant en 1959 *Le Principe de l'ordre par le bruit* (qui deviendra *Le Principe de l'organisation complexe par l'information*), H. Von Foerster, on l'a vu, introduisait une formulation qui prenait le contre-pied de celle d'E. Schrödinger, alors généralement acceptée par la "science positive", ("*L'ordre par l'ordre*" : "*Order from order*", dans *What is life ?*, 1944, p. 191 de la traduction française, 1986). En méditant sur cette formule au moment où se formait dans les années 1973-1981 *la théorie de l'autonomie* (entre le colloque de Royaumont sur "*l'unité de l'homme*" animé par E. Morin et M. Piatelli-Palmarini, et le colloque de Cerisy sur "*l'auto-organisation, de la physique au politique*" animé par P. Dumonchel et J.P. Dupuy), E. Morin dégageait une présentation opérationnelle du paradigme de l'organisation complexe que récapitule une formule dense par laquelle il l'a présentée, formule qui propose une sorte

d'instrumentation "*de la modélisation de l'organisation*" dont les quatre tomes publiés de *La Méthode* seraient à la fois l'écrin et l'argumentaire.

*Le paradigme de l'Eco-Auto-Ré-Organisation* permet en effet d'exprimer à la fois le caractère auto-producteur d'elle-même de toute organisation *s'autonomisant* dans un contexte ou un substrat dont elle est solidaire dans une permanente interaction *écosystémique* (qui l'affecte, ou la transforme, et par laquelle elle s'autonomise, se différenciant ainsi de ce substrat), et par une *morphogénèse* qui, inscrivant ses transformations dans une histoire dont elle garde mémoire : *ré-organisation* par le choix d'un itinéraire lors des *bifurcations* ouvrant l'accès à des futurs possibles. Choix qu'elle pourra peut-être conduire de façon autonome et téléologique si les capacités d'autonomisation dont elle se dote en fonctionnant et en se transformant, lui permettent de "se représenter" les termes de ces possibles ré-organisations (choix qu'elle abandonnerait à un déterminisme mécanique, génétique ou chaotique, si elle ne pouvait ou ne voulait exercer ces capacités d'autonomisation endogène) .

Cette appréhension de la complexité des phénomènes modélisés par leur éco-auto-ré-organisation va susciter des modes de compréhension (plutôt que d'explication) de leurs comportements et de leurs transformations dont le modélisateur assumera d'autant plus volontiers l'incomplétude (le modèle n'est jamais fini) qu'elle le mettra en situation d'une investigation "intelligente", lui suggérant des interprétations nouvelles qu'il tiendra souvent pour "*émergentes*".

#### LA COMPLEXITÉ APPELLE LA STRATÉGIE: COMPLEXITÉ ET ÉTHIQUE.

Le paradigme de la complexité organisée, par le caractère somme toute familier sinon rassurant des concepts qu'il empruntait sans beaucoup de précautions aux disciplines positives déjà établies au sein des paradigmes antérieurs de la mécanique rationnelle et de la mécanique statique, a incité à développer une conception des théories de la complexité de type *applicable*. On peut lire encore en 1995 des énoncés tels que celui-ci : "*la science de la complexité démontre que pour qu'un système soit innovant, créatif et transformable, il doit être conduit loin de l'équilibre où il peut faire usage du désordre, de l'irrégularité et de la différence comme des ingrédients essentiels du processus de changement*" (R. Stacey, "*The science of complexity*" in *Strategic Management Journal*, vol.16,477-495, 1995). Publié dans une revue scientifique honorable en conclusion d'un article correctement documenté, ce type de conclusion, que recherche habituellement le lecteur d'une étude scientifique, fait facilement illusion : on peut présumer qu'il existe une science de la complexité qui "*démontre*" ce que l'on "*doit*" faire pour atteindre tel but. On espère avoir assez souligné la légèreté épistémologique de ce type de propos qui sont de nature à compromettre l'attention que les institutions scientifiques consacrent aux développements contemporains des sciences de la complexité. Leur interprétation systématique en terme d'*applications*, d'outils forgés en mathématique, en physique, en biologie ou en informatique pour résoudre des problèmes compliqués formulés dans le contexte de telle discipline, risquera très souvent de s'avérer perverse dès lors qu'elle s'entend en termes résolutoires ("la science de la complexité démontre que...").

En revanche, bien sûr, utilisée en termes d'*heuristiques investigatrices* dans des contextes où l'on peut tenir leur mise en oeuvre comme plausible, de tels outils, qu'ils aient été développés au sein des sciences dures ou au sein des sciences douces (linguistique, logique naturelle, psychosociologie, sciences de l'ingénierie...etc.), sont

susceptibles de constituer des instruments localement fort bienvenus dans les exercices de modélisation des phénomènes perçus complexes. Mais leur usage ne s'entend plus alors dans la même démarche. Il ne s'agit plus de moyens présumés résolutoires permettant quasi certainement d'atteindre une fin préidentifiée, voire imposée, collections d'outils aussi aseptisés que possible tels que les outils statistiques que présentent les recueils de méthodologies. La démarche est alors élaboration permanente et tâtonnante de stratégies de modélisation et d'interprétation dont les buts initiaux sont a priori rarement les buts finaux, la mise en oeuvre d'un moyen apparemment adapté à telle fin intermédiaire suggérant au fil de la recherche l'idée d'autres fins intermédiaires possibles, voire souhaitables, lesquelles, à leur tour, suggéreront l'appel à d'autres moyens, moyens qui... etc. Stratégie de modélisation qui *"entrelace inextricablement des concepts avec des opérations et des données et avec des mots et signes d'étiquetage"*, stratégies *"induites par des buts subjectifs que l'on place dans le futur, mais qui façonnent les actions présentes. Ces buts liés à des croyances et à des anticipations, rétroagissent sur l'action au fur et à mesure que celle-ci en rapproche ou en éloigne, cependant que l'action, en se développant, modifie les buts..."* (M. Mioara Mugur-Schächter "Les leçons de la mécanique quantique", *Le Débat*, 94, mars 1997, p. 170).

Exercice de *conception* plutôt que d'*analyse* dira H. Simon (1969, p. 111), *"travail de l'ingénieur sur son épure"* suggérera P. Valéry (*Cahiers I*, p.854), *"stratégie cognitive"* dira E. Morin (*Les Théories de la complexité*, colloque de Cerisy, 1991, p. 269) : *"Penser sans jamais clore les concepts, briser les sphères closes, rétablir les articulations entre ce qui est disjoint, essayer de comprendre la multidimensionnalité, de penser avec la singularité, avec la localité, avec la temporalité (...) l'utilisation stratégique de ce que j'appelle la dialogique"*.

Stratégie de construction *d'images riches* ("*Rich pictures*") et de représentations symbolisantes innovantes (à la manière de Léonard de Vinci ou de P. Valéry), associant dans leurs *Cahiers* propos discursifs, schémas graphiques et stratégie d'interprétation par raisonnements délibératifs, suscitant souvent l'émergence d'une nouvelle issue qui s'avérera peut-être pertinente. Cette conception de la recherche *orientée problème* (quels projets dans quels contextes ?) plutôt qu'*orientée solution* (quel résultat par quels moyens ou méthodes ?), proposée (ou plutôt restaurée) par le paradigme des sciences de la complexité, appelant la stratégie plutôt que le résultat, se forme désormais de façon pragmatique ou tâtonnante, suggérant de nouvelles délibérations épistémologiques.

Cette transition des *méthodologies* vers les *stratégies* de recherche introduite par le développement du paradigme de la complexité va concerner au premier chef les réflexions sociales, culturelles et politiques contemporaines sur la complexité des processus de décision dans les contextes perçus complexes. Enjeu que l'on présente fréquemment en termes de choix *éthique*, en demandant implicitement à la science de déterminer ou de proposer *les bonnes décisions* que requièrent les sociétés. Les sciences positives ont longtemps affiché ici une position ambiguë, affirmant la supériorité a priori du jugement des *experts scientifiques*. Dans la mesure où elles appellent à *bien penser* -et donc à *enrichir et à délibérer* au mieux les connaissances qu'elles forment en les contextualisant et en les finalisant, les sciences de la complexité peuvent faire valoir qu'elles contribuent ainsi à ce *"bien penser qui est la source de la morale"* (Pascal).

Mais la reconnaissance de cette responsabilité épistémologique (bien penser les conditions de formulation des *connaissances enseignables* qu'elles produisent dans un contexte identifié) rend plus manifeste le caractère socio-culturel des conventions

éthiques que se forment les groupes sociaux. L'argument d'une *nécessité scientifiquement déterminée* s'efface au profit de celui d'une identification des *possibilités concevables* ; dès lors les choix successifs des actions possibles tenues ici et maintenant pour *souhaitables* ne sont plus spécifiquement une affaire de scientifiques, mais une question de politiques. Tout au plus pourra-t-on demander à ces derniers d'imaginer quelques maximes heuristiques pouvant aider les sociétés dans leur choix ; telle que, par exemple, celle suggérée par H. Von Foerster : "*agir toujours de façon à augmenter le nombre des choix*".

*Impératif éthique* auquel il associe volontiers un *impératif esthétique* : "Si tu veux voir, apprends à agir" (C. Segal "*Le rêve de la réalité, H. Von Foerster et le constructivisme*", 1990, p. 186).

## BIBLIOGRAPHIE

— **Ashby W.R.**, *An Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman and Hill Ltd, 1956.

— **Atias C., Le Moigne J.-L.** (éd.), *Science et conscience de la complexité* ; avec E. Morin, Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, 1984.

— **Bachelard G.**, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934, 1980.

— **Bateson G.**, *Steps to an Ecology of Mind*, New York, Chandler Pub. Cy, 1972 ; trad. fr., *Vers une Ecologie de l'esprit*, 2 vol., Paris, Seuil, 1977-1980.

— **Bocchi G.L., Ceruti M.** (éd.), *La Sfida della complessità*, Milano, Feltrinelli, 1985.

— **Bonabeau E., Théraulaz G.** (éd.), *Intelligence collective*, Paris, Hermès, « Systèmes Complexes », 1994.

— **CERISY (Colloque de)**, *Les Théories de la complexité, autour de l'œuvre d'Henri Atlan*, Seuil, 1991.

— **Descartes R.**, *Œuvres et lettres*, textes présentés par A. Bridoux, Paris, NRF-Pléiade, 1953.

— **Dupuy J.-P.**, *Ordres et désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, Seuil, 1982 ; *Aux Origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1994.

— **Ekeland I.**, *Au Hasard. La chance, la science et le monde*, Paris, Seuil, 1991.

— **Gell-Mann M.**, texte américain, 1994 ; trad. franç. G. Minot, *Le Quark et le jaguar. Voyage au cœur du simple et du complexe*, Paris, Albin Michel, 1995.

— **Glansdorff P., Prigogine I.**, *Structure, stabilité et fluctuations*, Paris, Masson et Cie, 1971.

— **Gleick J.**, texte anglais, 1987 ; trad. franç. C. Jeanmougin, *La Théorie du chaos. Vers une nouvelle science*, Paris, Albin Michel, 1989.

— **Holland J.H.**, *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis, with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.

— **Kuhn T.S.**, *The Structure of the Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, 1962-1970 ; trad. franç., *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983.

— **Langton C.G.** (ed.), *Artificial Life*, Santa Fe Institute Studies, Addison Wesley Pub. Cy, 1990.

— **Le Moigne J.-L.**, *La Modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod, 1990, 2e éd., 1995 ; *The Intelligence of Complexity*, in *The Science and Praxis of Complexity*, Tokyo, United Nations University (ed.), 1985, p. 35-61 ; *On theorizing the Complexity of Economic systems*, *The Journal of Socio Economics*, JAI Press, Fall 1995.

— **Lewin R.**, texte américain, 1993 ; trad. franç. B. Loubières, *La Complexité. La théorie de la vie au bord du chaos*, Paris, Interditions, 1994.

— **Morin E.**, *La Méthode. Tome I : La Nature de la nature*, Paris, Seuil, « Point », 1977 ; *La Méthode. Tome II : La Vie de la vie*, Paris, Seuil, « Point », 1980 ; *La Méthode. Tome III : La Connaissance de la connaissance*, vol. 1, Paris, Seuil, 1987 ; *La Méthode. Tome IV : Les Idées, leur habitat, leur vie, leurs mœurs, leur organisation*, Paris, Seuil, 1991 ; *Science avec conscience. Nouvelle édition complétée*, Seuil, « Point », 1990 ; *Introduction à la pensée complexe*, Paris, ESF, « Communication et Complexité », 1990.

— **Morin E., Piatelli-Palmarini M.** (éd.), *L'Unité de l'Homme*. 3 tomes : *I. Le Primate et l'Homme*, *II. Le Cerveau humain*, *III. Pour une Anthropologie fondamentale*, Paris, Seuil, « Points », 1974.

— **Mugur-Schächter M.**, *Les Leçons de la mécanique quantique ; vers une épistémologie formelle*, *Le Débat*, mars 1997, n° 93.

— **Nicolis G., Prigogine I.**, texte anglais 1989, trad. fr. sous la dir. de J. Chanu, *A la Rencontre du complexe*, Paris, PUF, 1992. — Prigogine I., *La Fin des certitudes*, Paris, Odile Jacob, 1996.

— **Prigogine I., Stengers I.**, *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard-NRF, 1979.

— **Quastler H.**, *The Emergence of Biological Order*, Yale University Press, 1964. — **Ruelle D.**, *Hasard et chaos*, Paris, Odile Jacob, 1991.

— **Shannon C.E., Weaver W.**, *The Mathematical Theory of Communication*, Chicago, University of Illinois Press, 1949 ; trad. franç., Paris, éd. RETZ-CEPL, 1975.

- **Simon H.A.**, *The Sciences of the Artificial*, 1961, 2nd ed. augmented, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1981, 3e éd. complétée non encore traduite, 1996 ; trad. franç., *Science des systèmes, sciences de l'artificiel*, Paris, Dunod, 1990 ; *Models of Bounded Rationality*, 2 vol., Cambridge, Mass., The MIT Press, 1982.
- **Stein D.L.** (ed.), *Lectures in the Sciences of Complexity* (Lectures vol. I), Santa Fe Institute Studies, Addison-Wesley Pub. Cy, « The Sciences of Complexity Serie », 1989.
- **U.N.U.-IDATE** (Université des Nations Unies), *Science et pratique de la complexité*, Paris, La Documentation Française, 1987.
- **Valéry P.**, *Cahiers 1894-1945*, 2 vol., Paris, Gallimard-NRF, « Pléiade », 1973 ; *Œuvres complètes*, 2 vol., Paris, Gallimard-NRF, « Pléiade », 1972.
- **Weaver W.**, Science and Complexity, in *American Scientist*, 1948, vol. 36, p. 536-544.
- **Weisbuch G.**, *Dynamique des systèmes complexes*, Paris, Inter Édition, 1989.

## CORRÉLATS

Adaptation, Algorithme génétique, Attracteurs étranges, Bachelard G., Catastrophe, Causalisme, Chaos, Computation, Constructivisme, Décision, Descartes R., Dialogique, Dynamique, Émergence, Entropie, Équilibration, Fractal, Information, Ingénierie, Intelligence, Irréversibilité, Mécanique statistique, Modélisation, Morin E., Morphogenèse, Organisation, Paradigme, Physiologie, Positivism, Prigogine I., Rationalité, Récursivité, Système, Shannon C., Simon H.A., Stratégie, Téléologie, Valéry P., Weaver W., Wiener N..



# SYSTEME

L'étonnante universalité de la notion de *système*, qui suggère l'attribution de quelques caractères communs à des phénomènes apparemment fort disparates, du système nerveux au système solaire par le système métrique et le système politique, intrigue depuis quelques siècles la recherche scientifique. Peut-on penser que le hasard ou l'arbitraire aient incité les humains à identifier tant de concepts familiers et mutuellement incommensurables par ce même préfixe *système* ? Ne faut-il pas présumer quelques invariants conceptuels masqués sous la diversité des attributs ? Former cette hypothèse plausible suggère déjà des programmes de recherche aux scientifiques qui les considèrent.

## LES SYSTÈMES SONT-ILS DANS LA NATURE ?

Condillac le soulignait déjà dans l'article "*Système (métaphysique)*" pour l'*Encyclopédie raisonnée des Arts et des Métiers*, peu après avoir publié son célèbre *Traité des Systèmes* (1749-1754) : "*Il n'y a point de science ni d'art où l'on ne puisse faire des systèmes. Mais dans les uns on se propose de rendre raison des effets, dans les autres, de les préparer et de les faire naître. Le premier objet est celui de la physique ; le second est celui de la politique.*" "*Observez l'esprit humain*", ajoutait-il dans son *Traité*, "*et vous verrez dans chaque siècle que tout est système chez le peuple comme chez le philosophe*".

Ce "*tout est système*" n'annonce-t-il pas le célèbre "*systems everywhere*" par lequel le biologiste L. Von Bertalanffy introduira deux siècles plus tard, la *General System Theory* (GST) ? Mais qu'est cet universel *système* ?

Les réponses que proposaient Condillac s'entendent dans le contexte du Siècle des Lumières qui, depuis Leibniz, cultivait volontiers ce concept fédérateur. Trois "*Systèmes de la Nature*" au moins, fort différents au demeurant, furent publiés entre 1735 et 1770 (Linné, de 1735 à 1768 ; Maupertuis en 1754 et Hollbach en 1770) ! Condillac publiait son *Traité des Systèmes* pour se démarquer explicitement de conceptions qu'il tenait pour trop théoriques ou abstraites ("*Descartes, Malebranche, Leibniz... chacun à l'envi nous en a prodigué*") ou trop hypothétiques ("*c'est l'insuffisance des maximes abstraites qui a obligé à avoir recours à ces sortes de supposition*"). Il plaidait pour les "*vrais systèmes, ceux qui ne s'appuient que sur des faits bien prouvés... systèmes qui exigent un assez grand nombre d'observations pour qu'on puisse saisir l'enchaînement des phénomènes*". Position empiriste inspirée par J. Locke que développera son "*Traité des sensations*" (1754), privilégiant une conception phénoménologique ou interactionniste de la connaissance qui tardera à réapparaître dans la réflexion scientifique : "*Nous ne pensons qu'au contact du monde*".

Cette définition instrumentale de Condillac : "*le système est ce qui permet à l'esprit humain de saisir l'enchaînement des phénomènes*" va pourtant progressivement constituer le noyau des conceptions contemporaines *constructivistes* du concept de système ; mais sa maturation au fil de ces deux siècles va s'avérer si effervescente que l'on ne peut ici qu'esquisser certains de ses traits saillants.

Effervescence dont témoigne dès l'origine la présentation même du concept de *système* par l'*Encyclopédie* : à l'article "*système (métaphysique)*" viendront très vite s'ajouter de nombreux autres paragraphes allant du "*système du philosophe chrétien*" au "*système en terme d'astronomie*", au "*système du monde*", au "*système de fortification militaire*", au "*système en musique*" ou au "*système en finance*". Au total, plus de quarante pages dont "l'enchaînement" sera souvent difficile à saisir ! Dès l'origine, le concept de système devra souvent être utilisé comme un *concept valise*, permettant à bien des auteurs ayant quelque difficulté à se faire entendre dans leur discipline d'origine, de publier leurs réflexions sous ce label sans se soucier beaucoup de la légitimité épistémologique et méthodologique de leur démarche.

Cet usage laxiste du concept de *système* compréhensible dans les écrits scientifiques et techniques du XVIII<sup>e</sup> siècle, alors que son statut épistémologique était encore fort confus, oscillant entre physique et métaphysique, se poursuivra jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, affectant longtemps sa respectabilité académique et retardant ainsi sa recevabilité par les institutions d'enseignement et de recherche.

Mais cette précipitation, en se décantant, nous laisse l'argument fort sur lequel pourra se développer l'épistémè du concept de système (on dira bientôt : *le paradigme (de la) systémique* : le système est ce qui permet à l'esprit humain de saisir l'enchaînement (puis les interactions) des phénomènes qu'il perçoit ou qu'il conçoit. Un langage pour "*l'exercice de la pensée, qui permette de raisonner abstraitement sans rompre avec la réalité sensible*" dira S. Auroux, présentant le dernier ouvrage de Condillac au titre significatif : "*La Langue des calculs*" (1780-1798). Le système n'est pas a priori dans la nature, il est dans l'esprit humain, lui permettant de *saisir l'enchaînement des phénomènes* ou de les modéliser intentionnellement pour nous les rendre intelligibles, disons-nous aujourd'hui.

*Le traité des systèmes* n'allait pourtant pas connaître une grande audience dans le siècle qui suivit. L'empirisme de Condillac s'estompa bientôt dans la culture scientifique du XIX<sup>e</sup> siècle, dominée par le cartésianisme et le rationalisme. Si bien que Claude Bernard, voulant restaurer *la Méthode expérimentale* la définira comme "*anti systématique... Les systèmes sont séduisants parce qu'ils donnent la science absolue réglée par la logique seule : ce qui dispense d'étudier... Il faut donc éviter avec soin toute espèce de système, et que la raison que j'en trouve, c'est que les systèmes ne sont point dans la nature, mais dans l'esprit des hommes*" (*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865, p. 297).

Ainsi l'argument de Condillac semblait se retourner contre sa thèse : puisque "*les systèmes ne sont pas dans la nature*", il faudrait "*éviter toute espèce de système*", ceci au nom du même empirisme que celui qu'il avait plaidé (en prolongeant la pensée de J. Locke) en recherchant le système modélisateur "*dans l'esprit des hommes*".

Sans doute faut-il ici encore entendre le propos de Claude Bernard dans son contexte culturel : la postérité ne tiendra-t-elle pas ce grand physiologiste pour un des "*grands précurseurs*" de la systémique contemporaine (L. Von Bertalanffy, GST, 1968, p. 12) ? Peut-être récusait-il plus volontiers une *systématique arborescente linnéenne* devenue *positiviste* sur laquelle se développaient *les sciences naturelles* au XIX<sup>e</sup> siècle (alors dans une inspiration souvent plus anatomiste ou morphologique que physiologique ou phylogénétique) qu'une *systémique* non linéaire dont le projet même semblait alors inconcevable ? Il en eut peut-être l'intuition en complétant sa profession de foi par un corollaire épistémologique, audacieux en 1870 : "*Le positivisme qui, au nom de la*

*science, repousse les systèmes philosophiques, a comme eux le tort d'être un système"* (p. 297). Autrement dit *"une doctrine... que l'on regarde comme immuable et ... que l'on se croit dispensé de soumettre désormais à la vérification expérimentale"* (p. 296). La thèse des *"vrais systèmes"* de Condillac réapparaissait par ce détour un siècle après sa publication : *"s'il y a des effets qu'il (le système) n'explique pas, on ne doit pas le rejeter, on doit travailler à découvrir les phénomènes qui le lient avec eux et qui forment de tous un seul système"* (article *"système, métaphysique"* de l'*Encyclopédie*, 1760) ! Si la théorie initiale du système semblait ainsi, sinon oubliée, du moins peu et malaisément invoquée tout au long du XIXe siècle et au début du XXe, peut-être faut-il en attribuer la responsabilité à deux des caractéristiques fondamentales que Condillac lui avait spontanément attribuées dans le contexte culturel duquel il l'avait élaborée.

- D'une part, il entendait la modélisation des phénomènes sur le schéma cartésien de l'enchaînement (*"ces longues chaînes de raisons toutes simples et faciles dont les géomètres ont coutume de se servir"*, *Discours de la Méthode*), suggérant ainsi le modèle de l'arborescence sans boucles sur lequel allait se construire la systématique, réduisant ainsi implicitement la théorie des systèmes à une théorie des systèmes linéaires de causes présumées efficientes ;

- D'autre part, il entendait la modélisation des phénomènes par l'observation des *"faits a-téléologiques"* (ou des objets ou des parties ou des résultats) plutôt que par celle des *"faire téléologiques"* (ou des actes ou des opérations ou des processus). Cette attention aux *faits* plutôt qu'aux *faire* va inciter le modélisateur à *"procéder à des dénombrements aussi entiers... (qu'il) fût assuré de ne rien omettre"* (*Discours de la Méthode*), et donc à fermer le modèle du système avant de l'interpréter. La modélisation des systèmes fermés devenait dès lors nécessairement *analytique*, ou anatomique ; on peut présumer que c'est cette caractéristique que le physiologiste Claude Bernard tenait pour dissuasive, l'incitant à ne pas privilégier un mode de représentation qui tenait compte de *l'état des organes* plutôt que de *l'activité des processus* auxquels il invitait le biologiste à s'intéresser.

Ce diagnostic de la réduction implicite de la modélisation d'un phénomène par un système fermé à la modélisation analytique, et de son interprétation par un raisonnement causaliste linéaire (ou déductif) allait être formulé par quelques épistémologues dès le début du XXe siècle. On cite aujourd'hui volontiers des pages fort explicites de *La Tektologie* de Bogdanov (1913) et surtout des *Cahiers* de P. Valéry (1894-1945), grâce auxquelles on peut aisément reconnaître les effets pervers du monopole de la modélisation analytico-linéaire dans les pratiques de la *"découverte scientifique"* depuis un siècle. Mais ces textes ne furent accessibles que dans les années 1970 (l'œuvre épistémologique de Bogdanov fut bannie sous l'ère stalinienne et n'est disponible que dans une traduction anglaise réduite (*Essays in tectology*), publiée par G. Gorelik en 1980 ; quant aux *Cahiers* de P. Valéry, ils ne furent édités par J. Robinson qu'en 1973), si bien qu'on ne peut leur attribuer le crédit du renouveau de la modélisation systémique qu'on observera dans les cultures et les institutions scientifiques deux siècles après la parution du *Traité des systèmes* de Condillac, à partir de 1948.

## **LE SYSTÈME DES SCIENCES APPELLE UNE SCIENCE DES SYSTÈMES.**

Sans doute est-ce à nouveau une confuse aspiration à *l'unité de la science* sinon à *l'unité de la connaissance* qui motivait les scientifiques auxquels on accorde le crédit

d'avoir alors "ré-activé" le concept de système dans la culture scientifique contemporaine... après "une aussi longue absence". Il ne semble pas qu'aucun de ceux dont on va évoquer les contributions à cette "Révolution scientifique" au sens de T.S. Kuhn (1963) qui allait voir l'émergence progressive des paradigmes de la *cybernétique* et de la *GST* puis de la *systémique* dans les discours et les pratiques des sciences aux abords de l'an 2000, aient dans les années 1950, eu souvenir du *Traité des systèmes* de 1749 ou de l'impressionnante effervescence que suscitait la notion de *système* dans la recherche scientifique au XVIIIe siècle.

La *systématique* elle-même, pourtant issue du premier *Système de la nature* de Linné (1735) semblait avoir épuisé son potentiel de production dans le développement des sciences naturelles au XIXe siècle. (Elle ne se renouvellera qu'à partir des années 70 avec l'essor et les controverses épistémologiques suscitées par *l'école cladiste ou phylogénétique* de W. Hennig, sans que ses contributions aux développements de la *systémique* contemporaine soit encore notables : voir P. Tassy, éd., *L'ordre et la diversité du vivant*, 1986).

En revanche les uns et les autres, bien qu'issus de champs disciplinaires très divers, souhaitaient manifestement retrouver les repères d'une unité de la connaissance que la diaspora des innombrables disciplines et sous-disciplines positives avait apparemment fait oublier. Aspiration culturelle qui se doublait d'une aspiration civique ou politique, les effets pervers pour les sociétés du scientisme prônés par les épistémologies positivistes alors dominantes, devenant insupportables à nombre d'entre eux : P. Valéry évoquera, en 1943 "*ce funeste présent de la science positive (...) que l'Europe (...) lègue au monde, c'est-à-dire à la vie des êtres vivants*" (*Cahiers*, Pléiade, II, p. 1533). La quête de ce "*Paradigme perdu, l'Unité de l'homme*" ainsi que l'intitulera E. Morin dans un essai devenu célèbre (1973), était aussi la quête de *l'Unité de la connaissance humaine*. Comment rendre compte de cette *Unité de la science* que ne parvenait plus à exprimer "l'arbre des sciences positives" apparemment immuable depuis qu'A. Comte l'avait dessiné en 1828 : chaque discipline semblant revendiquer la propriété exclusive de "son arbre", de son objet, de sa méthode, de ses procédures d'évaluation, en affichant son autonomie par rapport à toutes les autres et son indépendance arrogante vis-à-vis de la société. Les innovateurs n'ayant d'autres ressources que de constituer à leur tour une nouvelle sous-discipline, également autonome et de batailler pour l'imposer sur l'échiquier fermé des disciplines académiquement enseignables. Cette quête du "paradigme perdu" s'exprimait par les efforts de reconfiguration d'un "*système des sciences*" qui assure à la fois l'entendement des rapports du savoir et de la société, se percevant mutuellement en coévolution, et celui des relations des savoirs entre eux, savoirs se percevant dans leurs permanentes et multiples interactions, tant dans la définition de leur objet que dans le développement de leurs méthodes.

Cette méditation sur la reconfiguration du "*système des sciences*" ne s'explicitait sans doute pas initialement en ces termes. La revendication de l'unité de la science ne pouvait guère s'exprimer en terme de *système*, tant que ce terme ne serait pas lui-même restauré ou réhabilité dans la communication scientifique. Pour que l'expression *système des sciences* réapparaisse en 1967, dans l' *Encyclopédie Pléiade* animée par J. Piaget, pour désigner dans sa complexité une "classification" des disciplines que les modèles linéaires ou hiérarchiques traditionnels ne parvenaient plus à exprimer, il faudra que l'expression *science des systèmes* apparaisse à partir de 1962 et d'abord fort

timidement dans quelques textes des pionniers (L. Von Bertalanffy, *GST*, 1968, p. 89). Ceux-ci préféreront longtemps parler de théorie du ou des systèmes, de système (en) général, ou même plus maladroitement "*d'approche système*" (la traduction française de l'expression anglaise "*General System Theory*" introduite par L. Von Bertalanffy en 1950 et titre de son ouvrage le plus connu, suscite des controverses : de bons arguments justifiant "*Théorie du système général*" autant que "*Théorie générale du ou des systèmes*". On se référera ici, selon l'usage anglo-saxon, au sigle *GST* lorsqu'il faudra la désigner spécifiquement). Il faudra attendre la fin des années 70 pour que la *science des systèmes* s'institutionnalise progressivement comme une (nouvelle ?) discipline enseignable. Elle n'a peut-être pas encore assuré sa propre légitimité épistémologique, mais le pourra-t-elle jamais si elle assume le caractère récursif de sa constitution : le système des sciences légitime une science des systèmes qui à son tour le légitime et le transforme ?

En tentant, comme le firent les pionniers des années 50 "*d'ajouter une nouvelle discipline*" ("*a new field in science*" réclamait L. Von Bertalanffy dès 1947, *GST*, 1968, p. 253) sans remettre en question la classification hiérarchique des disciplines léguée par A. Comte, on ne suscitait pas les questionnements épistémologiques dont le concept de système "*outil de l'entendement*" ("*permettre à l'esprit humain de saisir les phénomènes*") était porteur. Et l'on suscitait de prévisibles conflits avec les nombreuses disciplines qui s'étaient approprié le mot *système* pour désigner rapidement "un ensemble fermé doté d'une application" ; la logique mathématique avait ses *systèmes formels*, l'algèbre ses *systèmes d'équation*, la physique ses systèmes mécaniques, les sciences naturelles sa *systématique*..., etc.. Le biologiste américain P. A. Weiss percevra en 1971 l'ambiguïté de cette désignation (*L'Archipel scientifique*, traduction française 1974, p. 98), au moment où la théorie analytique des ensembles devint l'instrument quasi universellement enseigné de la modélisation mathématique des phénomènes présumés réductibles à des ensembles fermés d'éléments irréductibles, et doté de quelque application fonctionnelle déterminée. Si la *théorie des ensembles* fait l'affaire, il n'est nul besoin de la rebaptiser *théorie des systèmes*. Mais si l'on veut "saisir le phénomène" autrement que de façon analytique, alors il importe de développer une théorie de la modélisation par les systèmes qui ne soit pas "ensembliste". "*Un système n'est pas un ensemble... et il est davantage qu'un ensemble complexe*". Cette confusion réduisant implicitement la notion de système à la notion d'ensemble sera soulignée peu après par Y. Barel dans "*Le Paradoxe et le système*" (1959) et incitera E. Morin (1977) comme P. Weiss (1974) à parler plus volontiers d'*organisation* que de *système* pour exprimer le mode d'entendement interactif et non réducteur a priori que peut permettre la représentation et l'interprétation des phénomènes par l'esprit humain *comme et par un système*. Mais la prégnance du mot système dans les cultures et les vocabulaires (son origine grecque, *sustema*, *agencement ou assemblage*, lui vaut d'être passé pratiquement sous la même forme dans toutes les langues européennes), et sans doute le manque d'attention épistémologique des pionniers qui le restauraient dans la culture scientifique vers 1950, retarderont longtemps la formation et l'acceptation du paradigme original dont il est porteur. «*La théorie générale des systèmes... a omis de creuser son propre fondement, de réfléchir le concept de système. Aussi, le travail préliminaire reste encore à faire*» pourra écrire E. Morin introduisant "*La Méthode*" en 1977 (p. 101). Depuis cette date ce travail se fait, associant au concept de système les concepts conjoints de complexité et d'organisation. Mais on ne peut présenter ce mûrissement en cours sans rappeler la

genèse (ou la renaissance) du concept de système dans les cultures scientifiques vers 1950.

L'aspiration à «l'unité de la science» que l'on trouve à l'origine s'entendait aisément à cette époque : le clivage entre les deux paradigmes scientifiques alors dominants et toujours rivaux, celui de la *mécanique rationnelle* et celui de la *mécanique statistique* était d'autant plus difficilement accepté qu'il ne permettait plus de rendre compte des évolutions des sciences biologiques (alors tiraillées entre des thèses mécanistes et vitalistes) et des sciences physiques classiques hésitantes devant la naissante mécanique quantique, comme de celles des sciences de l'homme et de la société, qui voulaient sortir du statut de sciences au rabais (ou «non-exactes») dans lesquelles les académies les enfermaient, et des sciences de l'ingénierie qui aspiraient à se libérer de l'image de sciences ancillaires, sciences d'application des nobles sciences physiques par laquelle on les incitait à se définir. C'est autour du concept de système que cette quête de l'unité et de l'équité interdisciplinaire allait aisément pouvoir s'exprimer et recueillir une audience suffisante, principalement en Amérique du Nord, dans les premières années suivant la deuxième guerre mondiale. On est surpris, cinquante ans après, par l'insistance que ces pionniers attachaient au caractère effectivement inter-disciplinaire de leurs initiatives, à une époque où l'on n'osait guère prononcer ce mot incongru !...

## **LA FORMATION DU PARADIGME CYBERNÉTIQUE.**

La première formation interdisciplinaire effective et rayonnante que l'on rencontre dans cette étonnante histoire est suscitée par des chercheurs réputés en sciences de l'ingénierie et en neurobiologie : l'association de N. Wiener, mathématicien célèbre, professeur au M.I.T. (l'institution nord-américaine alors la plus réputée dans les sciences de l'ingénierie), d'A. Rosenblueth, neurologue mexicain éminent, et de J. Bigelow, jeune et brillant ingénieur électronicien (avant que la discipline ne soit baptisée électronique !), dans la période 1942-1946, auteurs de la conception d'un système automatique de défense antiaérienne, va susciter une réflexion originale sur les processus de modélisation intentionnelle de processus perçus complexes, (qu'ils soient naturels ou artificiels), réflexion dont l'histoire garde trace par deux textes tenus pour fondateurs : leur article épistémologique «*comportement, intention et téléologie*», publié dans la revue "*Philosophy of science*" (1943, p. 18, 24) et l'ouvrage de synthèse publié par N. Wiener en 1948 : *Cybernetics, (science de la communication et de la commande dans les systèmes naturels (l'animal) et dans les systèmes artificiels)* ; ouvrage par lequel il établissait les deux "outils modélisateurs" essentiels que la cybernétique allait donner à la systémique en se développant : la notion de *boîte noire* ou de système fonctionnel et téléologique, et la notion de *feed-back informationnel* par laquelle pourra être exprimée la causalité circulaire. Dans ces mêmes années, N. Wiener s'était rapproché d'un neurophysiologiste réputé W. Mc Culloch (ami d'A. Rosenblueth), qui lui-même travaillait avec un jeune logicien J. Pitt, avec lequel il publiait alors un article de biophysique mathématiques proposant les bases de ce qui allait devenir la *théorie des réseaux neuronaux* («*A Logical Calculus on the Ideas Immanent in Nervous Activity*», B.M.B., 1943, p. 115, 133, repris dans "*Embodiment of Mind*", 1965). Dans ces mêmes années, un autre jeune ingénieur du MIT, C. Shannon, développait une théorie mathématique de la communication dont le Directeur de la Fondation Rockefeller perçut aussitôt l'originalité et la portée épistémologique (C. Shannon et W. Weaver : "*The Mathematic Theory of Communication*", 1948) et la

proximité avec la problématique que développait la naissante cybernétique ; problématique que découvrait un psychiatre anglais, R. Ashby, dont *"L'Introduction à la cybernétique"*, publiée en 1956, allait beaucoup contribuer à l'audience internationale de la discipline.

Ce bouillon de culture interdisciplinaire (qui concernera même un instant la réticente science économique, avec l'œuvre d'O. Lange : *"Introduction to Economic Cybernetic"*, 1965) ne fut pas longtemps restreint au «mariage des sciences de l'ingénierie et de la neurologie» (lettre de Wiener à Rosenblueth, 1945, rapportée par J.-P. Dupuy, 1994) : les échanges de N. Wiener avec le mathématicien J. Von Neumann (qui développait alors *"La Théorie des jeux"* avec l'économiste O. Morgenstern, 1944, et qui s'attachait à développer un des premiers ordinateurs) et ceux de W. Mc Culloch avec les anthropologues G. Bateson et M. Mead, allaient rapidement ouvrir le champ de ces recherches à presque toutes les disciplines : les dix *"Conférences Macy"* qui se réunirent de 1946 à 1953, sous le label de *"La Causalité circulaire et des mécanismes de feed back dans les systèmes biologiques et sociaux"*, puis sous celui de *"La Cybernétique"* (à partir de 1949, le titre initial devenant sous-titre), ont acquis aujourd'hui le caractère d'un «mythe fondateur» d'une possible... et difficile interdisciplinarité et d'une légitime restauration dans nos cultures de l'unité de la science : psychologues, linguistes, anthropologues, sociologues pouvaient utilement échanger et coproduire avec des biologistes, neurologistes, mathématiciens, ingénieurs... en s'intéressant à la représentation et à la compréhension de la communication et la commande téléologique dans les systèmes, quels qu'ils soient : un langage cybernétique pouvait se former, permettant l'échange effectif de savoirs et d'expériences, tant entre les disciplines qu'entre les sciences et la société. L'œuvre du physicien autrichien H. Von Foerster devenu, à partir de son arrivée en Amérique en 1949 le secrétaire de ces *Conférences Macy*, que nous connaissons aujourd'hui comme celle d'un bio-informaticien et surtout d'un épistémologue très novateur (*"Observing Systems"* qui recueille ses principaux articles, paraîtra en 1981), en témoigne : il la présentera plus souvent comme une contribution à *la cybernétique de deuxième ordre* (la cybernétique de la cybernétique, ou l'étude des systèmes exerçant récursivement sur eux-mêmes leur propre activité, engendrant ainsi leur propre processus d'autonomisation) que comme une contribution explicite à la *Systémique*, laquelle, il est vrai, n'affirmera son statut épistémologique propre qu'à partir de 1977-1980) mais, ce faisant, il reprendra le flambeau d'une réflexion sur la spécificité épistémologique de la cybernétique, «*scienza nuova*» se construisant sur un projet plutôt que sur un objet de connaissance ; réflexion qui fera de lui le chef de file de l'école nord-américaine des épistémologies constructivistes (L. Segal : *"Heinz Von Foerster et le constructivisme"*, 1986, trad. 1990) que J. Piaget avait restauré en Europe à partir de 1967 (Encyclopédie Pléiade *"Logique et connaissance scientifique"*). Cette réactivation d'une réflexion sur les fondements sera d'autant bienvenue qu'hormis l'article fondateur de N. Wiener, A. Rosenblueth et J. Bigelow de 1943 et un article rédigé par W. Mc Culloch peu avant sa disparition (*"Introduction historique aux postulats fondant une épistémologie expérimentale"*, 1964, publié dans *"Embodiments of Mind"*, 1965, p. 359-372), la discussion par *la cybernétique, science des systèmes pilotés* de sa propre légitimité épistémologique sera souvent légère. Comme la plupart des sciences de l'ingénierie et des sciences biologiques de sa génération (1945-1975), elle s'abritera implicitement, notoriété de ses fondateurs aidant, sous l'aile tutélaire des épistémologies positivistes alors parfaitement institutionnalisées. Il lui suffisait, leur semblait-il, de tirer argument pragmatique de l'efficacité de sa méthode modélisatrice, que présentait *"Cybernetic*

*Modeling*" de G. Klir et P. Valach en 1966 puis *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*" de M. Mesarovic et Al, 1970, souvent et volontiers cités. G. Bateson prendra conscience de la transformation des référentiels épistémologiques légitimant la scientificité de ces nouvelles disciplines, mais il ne l'explicitera qu'à partir de 1966 : «Je crois qu'avec la cybernétique, les hommes ont mordu au fruit défendu comme ils ne l'ont jamais fait depuis deux mille ans» (*Steps to an Ecology of Mind*, 1966-1972, rappelée par J.P. Dupuy, 1994, p. 66). Et lorsque peu après, J. Piaget demandera à S. Papert une étude sur «L'épistémologie de la cybernétique» pour son *Encyclopédie Pléiade* (1967), celui-ci préférera convenir que la discipline manquait encore par trop de maturité : ce «véritable écheveau de courants d'origines diverses» lui semblait pénalisé en quelque sorte par «l'audace même de son projet» (p. 823).

## LA FORMATION DU PARADIGME DE LA G.S.T.

Une autre formation interdisciplinaire, celle de la G.S.T., se développera presque en parallèle avec celle de la cybernétique, animée davantage initialement par des chercheurs en biologie et en sciences de l'Homme et de la société, à peu près dans les mêmes années, mais en affichant plus explicitement son projet épistémologique fondateur et son intention de ne pas se restreindre à la modélisation des seuls systèmes contrôlés : son père fondateur reconnu par la tradition est le biologiste autrichien L. Von Bertalanffy (qui n'émigrera en Amérique du Nord qu'en 1949, ce qui explique sans doute le léger retard chronologique que l'on attribue à la *"General System Theory"* (G.S.T.) par rapport à la cybernétique. Les historiens scrupuleux font remarquer que les textes principaux de L. Von Bertalanffy introduisant une *théorie des systèmes ouverts* puis des systèmes généraux (pour tenter de libérer la biologie théorique des modèles fermés que lui livraient les paradigmes de la mécanique rationnelle et statistique) furent publiés en allemand entre 1930 et 1950. (Une traduction française de *Les Problèmes de la vie* qu'il avait publié en allemand en 1948, présentant en conclusion la *"Théorie des systèmes généraux"*, sera éditée en 1960, Ed. Gallimard). Ils observent aussi qu'un scientifique nord-américain réputé, P. Weiss, riche de sa «double expérience de biologiste et d'ingénieur», aurait bien des titres légitimes à être tenu pour un père fondateur d'une *théorie des systèmes organisés* qui a beaucoup contribué à l'audience de la systémique dans les communautés scientifiques (son œuvre ne sera aisément accessible en français qu'à partir de l'édition, en 1974 de *"L'Archipel scientifique, études sur les fondements et les perspectives de la science"*. Mais c'est sans doute la constitution aux U.S.A. de la *"Société pour la recherche sur les systèmes généraux"* (S.G.S.R.) en 1954 par L. Von Bertalanffy entouré de quelques chercheurs éminents, en particulier l'économiste K. Boulding, qui va contribuer à populariser la G.S.T.. La S.G.S.R. se constitue au moment où, pour de multiples raisons contingentes, les *Conférences Macy* s'achèvent (elles ne se redévelopperont, dans un autre contexte, à l'initiative d'H. Von Foerster, qu'en 1959, sur le thème des systèmes auto-organisés (Yovit et Cameron, Ed., *Self Organizing Systems*, 1959). La communauté *"General Systems"*, comme elle s'appelait elle-même, va davantage intéresser les chercheurs en sciences de l'Homme et de la Société, heureux de trouver dans les formulations de la G.S.T. un langage permettant la communication au sein de leur discipline, que les chercheurs en biologie, longtemps réticents devant les présentations plus physiologiques qu'anatomistes (... voire moléculaires !) de leur discipline : J. Monod, dans *"Le Hasard et la nécessité, essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne"*, 1970, expédiera en une ligne la «vague théorie générale des systèmes de

L. Von Bertalanffy» (p. 94), affectant ainsi d'ignorer le chapitre sur «*Le Hasard et la loi*» que publiait dix ans auparavant, la traduction française de "*Les Problèmes de la vie, essai sur la pensée biologique moderne*" du même L. Von Bertalanffy. Il est vrai que celui-ci, en présentant la *General System Theory* comme «*la base d'une ontologie mathématique exacte, base également des homologies logiques entre les concepts généraux des différentes sciences*» (*Problèmes de la vie*, p. 248), affichait un programme à tout le moins fort immodeste, qui allait conduire nombre de ses exégètes et disciples à transformer une systémique encore embryonnaire en un syncrétisme fort peu scientifique, voire en une *idéologie systémiste* que d'aucuns proposeront de substituer à d'autres idéologies contemporaines fort partisans, voire doctrinaires (E. Laszlo : *Le systémisme, vision nouvelle du monde*, 1972-1981). Les analogies que suggèrent les représentations des systèmes vivants et des autres systèmes, naturels ou artificiels, sont souvent fécondes et intelligibles lorsqu'elles sont fonctionnelles ou génétiques (physiologiques), mais elles s'avèrent illusoire et fallacieuses lorsqu'elles prétendent s'exprimer en termes morphologiques ou organiques (anatomiques). En ne mettant pas assez en garde ses lecteurs sur cette difficulté, et en proposant d'intégrer à peu près tous les discours méthodologiques au sein de La Théorie du système général — ensembles, graphes, réseaux, automates, information, files d'attente, etc. (G.S.T., 1968, p. 17-24) — au nom d'une légitime aspiration à «l'unité de la science» qu'il exprime avec chaleur et enthousiasme, L. Von Bertalanffy révélait la légèreté épistémologique d'une discipline qui ne parvenait pas mieux que la cybernétique à assurer ses propres fondements. Faute d'entendre l'appel à «*cette critique épistémologique interne... instrument... de l'organisation intérieure des fondements*», que proposait J. Piaget (*Encyclopédie Pléiade*, 1967, p. 51), les tenants de la G.S.T. compromettaient son propre développement. Il reste que l'expérience modélisatrice acquise dans bien des domaines sous les auspices de la théorie des systèmes généraux, que ce soit en psychiatrie, en sociologie, en sciences politiques, en sciences de l'éducation, en sciences de l'ingénierie et en sciences de gestion, constituera une sorte de terreau au sein duquel les réflexions épistémologiques pourront à nouveau germer (G. Klir, Ed., *Trends in General Systems Theory*, 1972). Le gros recueil "*Unity Through Diversity*" colligé à la mémoire de L. Von Bertalanffy peu après sa disparition en 1972 (W. Gray et N. Rizzo, Ed., 1973) en fournit une sorte d'échantillon significatif, échantillon que l'on doit compléter par l'ouvrage du biologiste théoricien français, introducteur de l'oeuvre de P. Weiss dans nos cultures : "*Système, structure, fonction, évolution*", de P. Delattre (1971) propose une tentative aussi avancée que possible pour "formaliser" dans l'appareil de la mathématique ensembliste la théorie des systèmes et le programme de "*recherches interdisciplinaires*" (titre de la collection lancée par P. Delattre) qu'elle supportait.

## **LES MULTIPLES ORIGINES MONO-DISCIPLINAIRES DE LA NOTION DE SYSTÈME.**

Si la cybernétique privilégiant la *modélisation des systèmes pilotés* et la théorie du système général privilégiant la *modélisation des systèmes organisés* se sont développées entre 1945 et 1970 sur un projet explicitement interdisciplinaire, revendiquant leur contribution à l'unité de la science, d'autres expériences modélisatrices vont se développer dans la même période en appelant aussi aux ressources méthodologiques du concept de système mais sans ambition interdisciplinaire. Certaines s'avéreront même fort mono-disciplinaires, mais

l'expérience de l'instrumentation systémique qu'elles acquerront dans leurs pratiques spécifiques s'avérera souvent suffisamment portable pour être aisément assimilée par une *science des systèmes organisants (ou complexes)* qui trouvera progressivement son assise épistémologique à partir des années 1975-1980.

Certaines de ces expériences de la modélisation systémique mono-disciplinaires méritent ici une mention particulière ne serait-ce que par le nombre et la qualité des travaux qu'elles ont contribué (et contribuent encore) à susciter au sein ou aux marges de la systémique.

***La sociologie et la science politique*** s'approprièrent très tôt le concept de système, sous des formes qui allaient bientôt reprendre le structuro-fonctionnalisme puis le structuralisme. L'œuvre de T. Parson, mettant la notion d'action au centre de toute étude des organisations sociales, va dès 1951 proposer une interprétation des «systèmes sociaux (*The Social System*, 1951) par une théorie de l'action (*Toward a General Theory of Action*, 1951) qui va rayonner tant dans le domaine des sciences sociales que dans celui de la systémique naissante : il suffit d'évoquer les contributions de March et Simon (*Organizations*, 1958) ou de Crozier et Friedberg (*L'Acteur et le système*, 1977) parmi beaucoup d'autres (A. Wilden : *System and Structure*, 1980) pour témoigner. *Le Concept de système politique*, de J.-L. Vullierme, publié en 1989, constituera une synthèse magistrale de cette fécondation mutuelle, rendue possible par la maturation de la systémique après 1980, maturation activée ici par les réflexions sur les théories de l'autopoïèse que développera le sociologue et juriste allemand, N. Luhman (1986).

***Les sciences de gestion*** se constitueront en discipline autonome à partir de 1950, à partir de l'expérience modélisatrice de la *recherche opérationnelle* qui s'était constituée pragmatiquement sur une base interdisciplinaire pendant la Deuxième Guerre Mondiale, et de celle issue des *théories des processus de décision* (H.A. Simon, *Administrative Behavior, a Study of the Decision Making Process*, 1947) et *des jeux* (J. Von Neuman et O. Morgenstern, "*Theory of Games*", 1945). Elles se développeront entre 1950 et 1970 en coévolution avec la cybernétique et la General Systems Theory. (L'article de l'économiste K. Boulding qui donnera une large audience à la G.S.T. paraît en 1955 dans la revue *Management Science* : «*G.S.T., the Skeleton of Science*»). Les auteurs du premier manuel de recherche opérationnelle publié en 1952, R. Ackoff et C. Churchman deviendront au début des années 1970 les promoteurs des départements académiques de *Sciences des Systèmes*, et ils seront souvent tenus pour les avocats d'une «*Révolution Systémique*» (R. Ackoff "*The Systems Revolution*", 1974). Leurs travaux seront bientôt rejoints par ceux de Stafford Beer en Grande Bretagne ("*Platform for Change*", 1975) ou de J. Mèlèse en France ("*La Gestion par les systèmes*", 1968) ; les uns et les autres proposeront d'intégrer à ces divers courants de la systémique ceux de "*la Dynamique des systèmes*" développée par J.W. Forrester, qui proposait de combiner les exercices de modélisation cybernétique classique et des exercices de simulation informatique alors fort originaux ("*Industrial Dynamics*", 1961). Souvent présentée sous le nom de "*L'Approche système*" dans les années 70, (titre de l'ouvrage de C. Churchman : *The Systems Approach*, 1968), cette conception des "*systèmes de management*" ("*Management Systems*" de P. Schoderbeck, 1964) suscitera une importante floraison d'ouvrages visant à la populariser, dans toutes les cultures et dans toutes les langues : on cite fréquemment le "*Blauberg et Al*" en russe, traduction anglaise, 1977), ou en français, "*Le Macroscopie, vers une vision globale*" de J. de Rosnay, 1976, qui connaîtra une large diffusion. La demande de méthodologies

opératoires suscitée par l'apparition des *systèmes d'information et de décision informatisés* dans toutes les organisations contribuait sans doute beaucoup à la recherche d'un langage commun permettant d'associer ingénierie informatique et ingénierie organisationnelle. Mais les bases épistémologiques de la systémique qui se développait ainsi pragmatiquement allaient bientôt s'avérer trop légères. La révolution annoncée devenait au fil des années 70, une maturation difficile : le concept même d'«*analyse de système*» — oxymoron qui restaurait la modélisation analytique — en le dissimulant sous l'emballage systémique — que les sciences de gestion allaient privilégier pour se différencier de la cybernétique, devenait révélateur de cette légèreté épistémologique que peut produire une discipline incapable de procéder au «*nettoyage de sa propre situation verbale*» (P. Valéry) ? (B. Walliser, *Systèmes et modèles, introduction critique à l'analyse de système*, 1977).

**La psychologie et la psychiatrie** allaient apporter à la formation de la systémique dans les années 1960-1980 une contribution originale et féconde, qui eu, parmi ses mérites, celui d'un questionnement épistémologique permanent (qui se poursuit heureusement aujourd'hui). La contribution de J. Piaget au développement de la *psychologie génétique* depuis 1930 est trop connue pour qu'on la présente ici. Il fut sans doute le premier à l'inscrire dans la conjonction des paradigmes structuraliste et cybernétique ("*Le Structuralisme*" qu'il publie en 1968 en témoignage) et à susciter une intense réflexion sur la légitimation épistémologique des pratiques modélisatrices de la psychologie du développement (*L'Épistémologie génétique* paraît en 1970, peu après *L'Encyclopédie Pléiade : "Logique et connaissance scientifique"*, 1967). En revanche la contribution de G. Bateson et de *l'École de Palo-Alto* à laquelle on associe son nom, fut longtemps moins visible avant 1980. G. Bateson meurt la même année que J. Piaget). En proposant au psychothérapeute de consacrer son attention aux représentations complexes de l'interaction et de la communication du «patient désigné» avec son contexte (couple, famille...), il va contribuer à l'émergence d'une psychologie plus communicationnelle (ou systémique) qu'analytique : la théorie des paradoxes de la communication (*théorie du double bind*) est sans doute l'argument le plus cité de sa contribution aux développements de nouvelles formes de la psychothérapie (que l'on appellera familiale ou systémique), qui vont à leur tour permettre d'accumuler un riche terreau expérimental, ou clinique, terreau au sein duquel vont germer des réflexions épistémiques qui débordent le champ disciplinaire de la psychiatrie. *Le Dictionnaire des thérapies familiales* édité par J. Miermont, 1987, et traduit depuis en anglais, rassemble une large part de ces matériaux et de ces réflexions : les apports de la psychothérapie à la systémique en formation, s'y manifestent dans leur permanente interaction. "*L'Homme autonome, éco-anthropologie de la communication et de la cognition*" de J. Miermont en proposera une synthèse à jour en 1995 des principaux développements récents de cette coévolution épistémique des sciences de l'homme et des sciences des systèmes.

Il nous faut sans doute attacher à l'examen des contributions mutuelles de la psychologie et de la systémique, celles engendrées par le développement plus récent des **sciences de l'éducation** se dégageant progressivement des matrices structuralistes ou praxéologiques dans lesquelles elles s'étaient reformées. L'œuvre de G. Lerbet inspirée à la fois par la pensée de J. Piaget et par celle de K. Rogers, caractérise cette évolution originale des "*Nouvelles Sciences de l'éducation*" (titre de son ouvrage publié en 1995).

*Les sciences de la computation et de la cognition artificielle* (Informatique et intelligence artificielle) se sont développées, dès l'origine de façon si enchevêtrée avec la cybernétique que l'on a quelque difficulté à les présenter de façon distincte. C'est sans doute la priorité apparente que «l'informatique pratiquée» a attachée très tôt à *l'algorithmique numérique*, et que «l'intelligence artificielle enseignée» a attachée à la *logique mathématique*, qui ont incité à différencier en pratique les deux domaines. Le paradoxe d'une science informatique, qui abuse du vocable de système sans s'interroger sur sa signification et sa portée a été souvent dénoncé pour mettre en valeur l'inattention fréquente de la discipline à ses propres fondements épistémologiques. Mais cette relative indépendance apparente ne doit pas masquer une «consanguinité» épistémologique dont rendent compte les contributions d'A. Newell et d'H.A. Simon en particulier. En reconnaissant dans la naissante systémique sa capacité modélisatrice ou symbolisante (*l'inventio* de la rhétorique) et sa capacité à *saisir* les modes de raisonnement dialectique ou récursif par l'exercice des heuristiques investigatrices (*heuristic search*), ils pourront développer les fondements d'une intelligence artificielle qui soit autre chose qu'une *théorie des automates programmables* en restaurant le caractère téléologique de l'intelligence. Leur démarche les conduira à une discussion critique du caractère, par trop superficiel de la cybernétique et de la théorie des systèmes dans la période 1945-1975, et aux premières formulations d'une *épistémologie d'une science de la computation et d'une science de la cognition* qui deviendra une des premières contributions à l'épistémologie alors en formation de la science des systèmes (H.A. Simon, *The Sciences of the Artificial*, 1969-1996, traduit sous le titre "*Science des systèmes, sciences de l'artificiel*" ; et la *Conférence Turing 1975* de A. Newell et H.A. Simon : «*Computer Science as an Inquiry : Symbol and Search*»). La *science de la cognition* qui émergera à partir de 1972 (A. Newell et H.A. Simon : "*Human Problem Solving*", 1972) va ainsi se constituer, devenant une des composantes principales de la formation de la systémique contemporaine à partir de 1980 (E. Andreewsky, Ed. : *Systémique et cognition*, 1991).

**L'écologie, les géosciences, les sciences de l'aménagement, les sciences de l'aménagement...** constituent un autre creuset important de la formation de la science des systèmes contemporaine. Il semble difficile de différencier ce qui fut emprunt et ce qui fut apport de ces disciplines encore en formation à la systémique. Il est certain que cette dernière y trouva un terrain exceptionnel d'expériences modélisatrices très diverses, expériences qui confirmaient la généralité et la portabilité des concepts qu'elle dégageait (feedback informationnel, variété requise, coévolution, autorégulation, durabilité et équilibration, auto-éco-ré-organisation, symbolisation et finalisation endogène, autopoïèse, etc.). Mais le rapport de ces jeunes disciplines avec la systémique semble aussi enchevêtrée que le rapport de cette dernière avec la vieille science économique : «Elles ne peuvent pas s'en passer, mais elles ne veulent pas en convenir». Peut-être faut-il pourtant mentionner pour son caractère exemplaire, la récente apparition de la *géophysologie* candidate aussi légitime que la *géophysique* à l'étude des *géo-systèmes* : les moqueries académiques qui accueillent *l'hypothèse Gaia* de J. Lovelock en 1980, s'atténuent quinze ans après alors que la géologie forme, le programme d'inspiration fort systémique de la géophysologie (P. Westbroek - "*Life as a Geological Force*", 1991).

## LE PARADIGME DES SYSTÈMES COMPLEXES.

Si l'on en juge par le nombre d'ouvrages et d'articles traitant de la science des systèmes en des termes relativement neufs, au moment où les paradigmes jumeaux de la cybernétique et de la G.S.T. semblent devoir s'essouffler (ou se reproduire sans se transformer ; on évoque souvent les actes d'un célèbre colloque organisé en 1969 par A. Koestler : *Beyond Reductionism, New Perspectives in the Life Sciences*, pour illustrer ce handicap d'une systémique se réduisant à un anti-réductionnisme sans lui proposer encore d'alternative épistémique), on peut sans doute considérer la période charnière dans cette évolution épistémique : à partir de 1980, on peut légitimement parler d'une *science des systèmes ou systémique* correctement argumentable en termes épistémologiques, et suffisamment expérimentée en termes pratiques ou cliniques pour être enseignable : prototype des «*nouvelles sciences fondamentales de l'ingénierie*», se définissant sur un projet de conception téléologique et non plus d'abord sur un programme d'application automatisable, pour les uns ; et prototype des « *futures sciences de la complexité*» se construisant sur des projets de connaissance active et non plus d'abord sur un objet de connaissance présumé indépendant de l'observateur. Les textes que l'on tient aujourd'hui pour les textes de référence paraissent pratiquement tous dans ces années et seront pour la plupart fréquemment réédités ensuite : les deux premiers tomes de *La Méthode* d'E. Morin, (1977 et 1980), *La Nouvelle Alliance* d'I. Prigogine et d'I. Stengers (1979), *Entre le Cristal et la fumée* d'H. Atlan (1979), "Principle of Biological Autonomy" de F. Varela, (1979), "Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid" de D. Hofstadter (1979), "Observing Systems" de H. Von Foerster (1980), "Les Systèmes du destin" de J. Lesourne (1976), "Le Paradoxe et le système" d'Y. Barel (1979), "Le Social et le vivant" de J. Fontanet (1977), "L'Économique et le vivant" de R. Passet (1979), "Symbole et société" de C. Roig (1977), "La Théorie du système général, théorie de la modélisation" de J.-L. Le Moigne (1977), "Ordre et désordre, enquête sur un nouveau paradigme" de J.-P. Dupuy (1982), et "La Notion de système dans les sciences contemporaines", ouvrage collectif édité par J. Lesourne (1981).

Cette systémique de deuxième génération (sous sa forme substantive, le mot systémique n'apparaît qu'après 1975 pour désigner la *science des systèmes*) assume entièrement l'héritage et le capital d'expérience modélisatrice que lui lèguent les divers affluents de la première génération (affluents que récapitulait alors un recueil d'une soixantaine d'articles "historiques" colligés par W. Buckley en 1968 (*Modern System Research*). Mais elle prend l'initiative d'une progressive construction des fondements épistémiques, dont l'absence ou la légèreté devenaient alors manifestes, en assumant la difficulté paradigmatique de son entreprise : si «*les systèmes ne sont pas dans la nature, mais dans l'esprit des hommes*», la science des systèmes doit trouver en elle-même sa propre permanente fondation : elle ne dispose plus d'un «*méta-niveau, connaissable ou inviolable*», sur lequel elle puisse construire et légitimer en toute certitude les énoncés qu'elle construit, et elle doit assumer le caractère temporel et récursif, ou la dynamique auto-référentielle de sa propre production : «*Toute connaissance acquise sur la connaissance devient un moyen de connaissance éclairant la connaissance qui a permis de l'acquérir*» (E. Morin, *La Méthode*, T. III, 1986, p. 232). Exercice épistémologique qui aurait été difficile si l'expérience de la modélisation systémique que forgeaient alors les sciences de la cognition et de l'intelligence (la neurophysiologie et l'immunologie (*théories de l'autopoïèse*), comme

les théories de l'information en biologie ou en thermo-dynamique (*théorie de l'auto-organisation*), n'avaient pas apporté dans ces années critiques, au appareil conceptuel original que des chercheurs issus de pratiquement toutes les disciplines surent s'approprier (le Colloque de Cerisy "*L'auto-organisation, de la physique au politique*", P. Dumonchel et J.-P. Dupuy, Ed., 1983, en témoigne). Il s'agissait de passer d'une modélisation des systèmes organisés, présumée indépendante du modélisateur, à *une modélisation des systèmes à la fois organisant et s'organisant*, auto-organisation entendue dans son caractère à la fois (inséparablement) dynamique (irréversible) et récursif, fonctionnel et morphogénétique («En fonctionnant le système se transforme ; en se transformant il fonctionne...»). Auto-organisation qui se forme par l'ouverture et l'activité du système modélisé dans les contextes avec lesquels il coévolve, qu'il transforme et qui le transforme : *Auto-Eco-Ré-organisation*, inséparablement dira E. Morin (La Méthode, T. II, 1980).

Cet entendement du *système s'organisant* impliquera la progressive reconnaissance du caractère potentiellement téléologique de l'interprétation de son comportement : entre le hasard statistique et la nécessité mécanique, reconnaître l'occurrence des processus endogènes de finalisation rendant intelligible la lecture des dialectiques fins-moyens-fins... par lesquels bien des comportements et des transformations perçus complexes pourront être entendus. Processus de finalisation qui pour être opératoires impliqueront des formes d'adaptation «intelligente». Intelligence qui s'exprimera par la capacité du système à se construire des représentations de sa propre activité, à «*s'in-former*», en produisant des systèmes de symboles computables qu'il pourra soumettre à des délibérations tâtonnantes afin d'élaborer téléologiquement ses décisions de comportement. Scénario modélisateur aux multiples variantes possibles, du schéma énergétique optimisateur simple et présumé naturel ("*Le principe de moindre action*") à celui du schéma informationnel aux multiples dimensions au sein duquel s'exercent les tâtonnements d'une rationalité délibérante.

Le modélisateur passe alors d'une attitude d'*analyste* à une attitude de *concepteur*, attentif plus au processus (*la modélisation*) qu'au résultat (*le modèle*). L'appareil de ces pratiques modélisatrices s'agence pas à pas en une construction théorique qui devient celle de la systémique, *théorie des méthodes de modélisation intentionnelle de phénomènes perçus complexes*. Théorie qui suscite en retour la construction de son référentiel épistémologique : le développement depuis 1967 (J. Piaget et H. Von Foerster) des épistémologies constructivistes se formant sur cette critique interne semble ainsi catalysé par une progressive reconstruction pragmatique de la *science des systèmes* que ne compromet plus une conception trop figée et trop exclusive du *système des sciences*. Science de la modélisation systémique qui se sait maintenant héritière de la *science de l'argumentation* rhétorique et dialectique, forgée par les penseurs et les stratèges de la Grèce antique : ne reconnaît-on pas les questions de *l'Inventio* dans la présentation contemporaine de *la forme canonique du système en général : quelles fonctions et quelles transformations, dans quels contextes, pour quels projets, inséparablement, irréversiblement et récursivement ?*

Questions qui furent alors, et qui sont à nouveau, à l'origine d'une réflexion épistémologique sur l'articulation des faire et des savoirs humains médiatée par les représentations symboliques que construit «*l'esprit humain cherchant à saisir les phénomènes... pour en rendre raison, et pour les préparer et les faire naître*». N'est-ce pas dans cet esprit que G. Bachelard nous invitait à reconnaître *Le Nouvel Esprit scientifique* (1934) : «*Il ne s'agit pas de recenser des richesses, mais d'actualiser une*

*méthode de connaissance*» (p. 148). La modélisation systémique rend praticable aujourd'hui ce «*retournement de la perspective épistémologique*» (p. 153).

## BIBLIOGRAPHIE

— **Andreewsky E.** (et Coll.), *Systémique et cognition*, Paris, Dunod, « AFCET-  
Système », 1991.

— **Atlan H.**, *L'Organisation biologique et la théorie de l'information*, Paris, Hermann, 1972.

— **Barel Y.**, *Le Paradoxe et le système. Essai sur le fantastique social*, 1979 ; *Le Paradoxe et le système. Essai sur le fantastique social. Nouvelle édition augmentée*, Grenoble, P.U.G., 1989.

— **Barel Y.** (ouvrage collectif), *Système et paradoxe, autour de la pensée d'Yves Barel*, Paris, Seuil, 1993.

— **Bateson G.**, Texte américain colligé par R.E. Donaldson, 1991 ; trad. fr. J.J. Wittezaele, *Une Unité sacrée - quelques pas de plus vers une écologie de l'esprit*, Paris, Seuil, 1996.

— **Beer S.**, *Platform for Change*, New York, J. Wiley and Sons, 1975

— **Bogdanov A.**, *Essays in Tektology (1913-20)*, trad. angl. G. Gorelik, Seaside, Cal., Intersystems Publication, 1980.

— **Boulding K.**, *The Image*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1956.

— **Buckley W.** (Ed.), *Modern Systems Research for the Behavioral Scientist*, Chicago, Aldine Publishing Cy, 1968.

— **Cellerier G., Papert S., Voyat G.**, *Cybernetique et épistémologie*, Paris, PUF, 1968.

— **Churchman C.W.**, *The Design of Enquiring Systems*, New York, Basic Book Pub., 1971.

— **Condillac E.**, *Traité des systèmes (1749-1798)*, Paris, Fayard (Corpus des œuvres de philosophie), 1991.

— **Crozier M., Friedberg E.**, *L'Acteur et le système*, Paris, Seuil, 1977.

— **Delattre P.**, *Système, structure, fonction, évolution*, Paris, Maloine, 1971, 2e éd., 1985.

- **Dumonchel P., Dupuy J.-P.** (Ed.), *L'auto-organisation. De la physique au politique*, Paris, Seuil, 1983.
- **Fontanet J.**, *Le social et le vivant*, Paris, Plon, 1977.
- **Forrester J. W.**, texte américain, 1965 ; trad. fr. P.S. Baron, *Principes des systèmes*, Lyon, Presses Universitaires de Lyon, 1980.
- **Gray W., Rizzo N.** (Ed.), *Unity through Diversity - a Festschrift for L. Von Bertalanffy*, 2 tomes, New York, Gordon and Breach, 1973.
- **Hofstadter D.R.**, *Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid*, New York, Basic Book, 1979 ; trad. fr., Paris, Inter Edition, 1985.
- **Jacob F.**, *Le Jeu des possibles*, Paris, Fayard, 1981.
- **Kant E.**, *Critique de la faculté de juger* (1793, trad. inédite A. Renault), Paris, Aubier, 1995.
- **Katsenelinboigen A.**, *Some New Trends in Systems Theory*, Salinas, Cal., Intersystems Publications, « The Systems Inquiry Series », 1984.
- **Klir J., Valach M.**, *Cybernetic Modeling*, London, Cliffe Books Ltd, 1966.
- **Klir G.J.**, *Facets of Systems Science*, New York, Plenum Press, 1991.
- **Koestler A., Smythies J.**, *Beyond Reductionism*, London, The Hutchinson Pub. Ltd, 1969.
- **Largeault J.**, *Systèmes de la nature*, Paris, J. Vrin, 1985.
- **Laszlo E.**, *Le Systémisme, vision nouvelle du monde*, Paris, Pergamon Press, 1981.
- **Le Moigne J.-L.**, *La Théorie du système général, théorie de la modélisation*, Paris, PUF, 2e éd. augmentée, 1977, 4e éd. complétée, 1994 ; *Le Constructivisme. Tome I : Des Fondements ; Tome II : Des Epistémologies*, Paris, ESF, 1994-1995 ; Sur la Capacité de la raison à discerner la rationalité substantive et la rationalité procédurale, dans J.C. Passeron et L.A. Gérard-Varet (Eds), *Calculer et raisonner, les usages du principe de rationalité dans les sciences sociales*, Paris, Editions de l'E.H.E.S.S., 1993, chap. 2.
- **Lerbet G.**, *Système, personne et pédagogie. Une Nouvelle voie pour l'éducation*, Paris, ESF, 2e éd. augmentée, 1993.
- **Lesourne J.** (Ed.), *La Notion de système dans les sciences contemporaines*, 2 vol., Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, 1981.
- **Lichnerowicz A., Perroux F., Gadoffre G.** (Eds), *L'Idée de régulation dans les sciences*, Paris, Maloine Doin, « Recherches Interdisciplinaires », 1977.

- **Mattesich R.**, *Instrumental Reasoning and Systems Methodology*, Dordrecht, Holland, D. Reidel Pub. Cy, 1978.
- **Maturana H., Varela F.**, *Autopoïesis and Cognition : the Realization of the Living*, Boston, D. Reidel, 1980.
- **Mc Culloch W.S.**, *Embodiments of Mind*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1965, 2e éd. 1988.
- **Mélèse J.**, *Approches systémiques des organisations*, Paris, Ed. Hommes et Techniques, 1979.
- **Mesarovic M.D., Macko D., Takara Y.**, *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*, New York, Academic Press, 1970.
- **Miermont J.**, *L'Homme autonome, éco-anthropologie de la communication*, Paris, Hermès, coll. « Systèmes Complexes » (sous la dir. de P. Bourguine et E. Bonabeau), 1995.
- **Morin E.**, *Le Paradigme perdu : la nature humaine*, Paris, Seuil, 1973 ; *La Méthode*, tome I, Paris, Seuil, 1977.
- **Mugur-Schächter M.**, Les leçons de la mécanique quantique. Vers une Epistémologie formelle, *Le Débat*, mars-avril 1997, n° 94, p. 169-192.
- **Orillard M. et Le-Moigne-J.-L.** (Ed.), *Systémique et complexité*, Numéro spécial de la *Revue Internationale de Systémique*, 1990, vol. 4, n° 2.
- **Piaget J.**, *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard, « Encyclopédie de la Pléiade », 1967.
- **Robinson-Valéry J.** (Ed.), *Fonctions de l'esprit : treize savants redécouvrent Paul Valéry*, Paris, Hermann, 1983.
- **De Rosnay J.**, *Le Macroscopie, vers une vision globale*, Paris, Seuil, « Point », 1975.
- **Schoderbek P.**, *Management Systems*, New York, J. Wiley and Sons, 1967.
- **Segal L.**, Textes anglais et allemands, 1986 ; trad. fr. A.L. Hacker, *Le Rêve de la réalité. Heinz Von Foerster et le constructivisme*, Paris, Seuil, 1990.
- **Simon H.A.**, *Administrative Behavior, a Study of the Decision-Making Process in Administrative Organization*, New York, Mac Millan Pub. Cy, « The Free Press », 1945-1947, 3rd ed. expanded, 1976 ; *Reason in Human Affairs*, Californie, Stanford University Press, 1983.
- **Tassy P.** (Ed.), *L'Ordre et la diversité du vivant. Quel statut scientifique pour les classifications biologiques ?*, Paris, Fayard, « Fondation Diderot », 1986.

- **Thom R.**, *Stabilité structurelle et morphogénèse, essai d'une théorie générale des modèles*, Paris, Ed. W.A. Benjamin, Reading U.S.A., Diffusion Ediscience, 1972.
- **Tinland F.** (Ed.), *Systèmes naturels et systèmes artificiels*, Seyssel, Ed. Champvallon, « Coll. Milieux », 1991.
- **Trapp R., Horn W., Klir G.J.**, *Basic and Applied General Systems Research : A Bibliography 1977-1984*, New York, Hemisphere Pub. Corp., 1985.
- **Valéry P.**, *Cahiers 1894-1914*, édition intégrale annotée sous la direction de N. Celeyrette-Pietri et J. Robinson-Valéry, Paris, Ed. Gallimard, vol. I, 1987 ; vol. II, 1988 ; vol. III, 1990 ; vol. IV, 1992.
- **Van Gigch J.P.**, *Applied General Systems Theory*, New York, Harper and Row, Pub., 1974.
- **Varela F.J.**, *Principles of Biological Autonomy*, New York, North Holland Pub. Cy, 1979.
- **Von Bertalanffy L.**, *Théorie générale des systèmes*, traduit de l'américain, Paris, Ed. Dunod, 1968-1973 ; texte allemand, 1948, trad. fr. M. Deutsch, *Les problèmes de la vie. Essai sur la pensée biologique moderne*, Paris, Gallimard, 1961.
- **Von Foerster H.**, *Observing Systems, with an Introduction by F.J. Varela*, Seaside, Cal., Intersystems Publications, 1st ed., 1981 ; 2nd ed., 1984.
- **Vullierme J.L.**, *Le Concept de système politique*, Paris, PUF, 1989.
- **Weinberg G.M.**, *An Introduction to General Systems Thinking*, New York, J. Wiley and Sons, 1975.
- **Weiss P.A.**, Texte anglais, trad. fr., *L'Archipel scientifique*, Paris, Ed. Maloine, 19 .
- **Westbroek P.**, *Life as a Geological Force. Dynamics of the Earth*, New York, W.W. Norton Cy, 1991, Norton Paperback 1992.
- **Wiener N., Rosenblueth A., Bigelow J.**, Behavior, Purpose and Teleology, dans *Philosophy of Science*, 1943, vol. n° 10, trad. fr., dans *Etudes Philosophiques*, 16e année, CNRS-PUF, 1959 ; *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Paris, Librairie Hermann et Cie, 1948, éd. suiv. complétées, the MIT Press, Cambridge Mass..
- **Wilden A.**, *Systems and Structure*, London, Tavistock Pub. Ltd, 1972.
- **Yovits M. et Cameron S.** (Ed.), *Self Organizing Systems*, New York, Pergamon Press, 1960.
- **Zadeh L.A., Polak E.**, *System Theory*, New York, Mc Graw Hill Book Cy, 1969.

— **Zeleny M.** (Ed.), *Autopoïesis, a Theory of Living Organization*, New York, North Holland Pub. Cy, 1981.

## **CORRÉLATS**

Action, Autonomie, Auto-Poïèse, Barel Y., Bogdanov A., Cognition, Communication, Complexité, Condillac E. de, Cybernétique, Dialectique, Évolution, Fonction, Information, Intelligence, Logique naturelle, Mécanique, Modélisation, Morin E., Morphogenèse, Organisation, Paradoxe, Piaget, Régulation, Rhétorique, Réseau, Systématique, Téléologie, Transformation, Von Bertalanffy L..

# COMPUTATION

Le concept de *computation* souffre sans doute encore, même en anglais, sa langue d'origine, de sa proximité étymologique avec le concept familier de *calcul* (ou de *calculation* en anglais), qui évoque toujours l'action de *compter* (issu précisément du latin *computare* : *calculer, faire des comptes*). Avait-on besoin de ce synonyme apparemment redondant, alors que la mathématique dégageait le calcul de sa gangue comptable (ou numérique), en inventant les multiples formes contemporaines du calcul : matriciel, tensoriel, intégral, fonctionnel, voire plus récemment, logique ?

Le développement étonnant des sciences et des techniques informatiques depuis un demi siècle suscite pourtant des questionnements épistémologiques originaux que l'on ne parvient plus à discuter en s'aidant de l'appareil sémantique du calcul, légué par l'arithmétique, l'analyse numérique ou la logique, dès lors que l'on s'interroge sur le sens de ce que l'on fait en manipulant une *machine digitale computante*, que les français appellent souvent *ordinateur* et les anglo-saxons *computer*.

La progressive formation d'une théorie et d'une science de la computation, née au sein de la logique formelle dans les années 30, et qui s'en émancipe peu à peu, répond semble-t-il à cette demande de concepts adaptés à ce nouveau paradigme.

M. Minski, auteur en 1966 du premier manuel d'enseignement de la théorie de la computation (on parlera plus volontiers en français d'*informatique théorique* dans les années 80) pourra prédire que "*le concept de computation (...) apparu récemment, promet d'être aussi important dans la culture scientifique moderne que le furent les idées de géométrie, de calcul ou d'atome*" *Computation finite and infinite machines*, p. VIII.

## LA MACHINE DE TURING, MACHINE COMPUTANTE

Les premières définitions de la computation ne la présentaient pourtant pas de façon très différente de celles du calcul. Il s'agit toujours de la manipulation selon des règles stables de systèmes de symboles afin d'atteindre des buts ("la solution" ). Si ces symboles sont des nombres et si ces règles sont celles de l'arithmétique, la computation est le calcul numérique. Il est alors tentant d' automatiser ou de faciliter à l'aide d' artefacts (bâtons, cailloux, bouliers, calculatrice de Pascal...) l'exercice de ces règles de calcul. Les calculatrices mécaniques puis électromécaniques se développeront beaucoup entre 1850 et 1950. Le *moteur calculant* (*calculating engine*) conçu par l' Anglais C. Babbage vers 1830 constitue le plus bel achèvement de la théorie du calcul numérique, mais il nous intéresse ici car pour concevoir cette machine, Babbage avait dû introduire un nouveau concept, qu'il appela *l'appareil computant* (*computing apparatus*). Cet appareil computant était un composant essentiel du *magasin* (*store* , nous dirons la *mémoire*), lequel était explicitement distinct du *moulin* (*mill*, appareil comptant les digits, *digits counting apparatus*). La distinction entre les fonctions de calcul numérique ou digital, et celles de computation, s'exerçant principalement à l'affectation des adresses en mémoire, apparaît ainsi pour la première fois, semble-t-il (A. Hyman. *Babbage, pioneer of the computer*, 1982, p. 272).

Ce fut initialement par un tout autre détour que le concept de computation réapparut dans la science contemporaine, à l'initiative d'un jeune logicien anglais, A. Turing, en 1936. Certes, rares furent à l'époque les scientifiques et les ingénieurs qui prêtèrent attention à l'article qu'il publia alors (dans les *Proceedings de la London Mathematical Society* article aujourd'hui accessible dans un recueil de textes essentiels édité par H. Davis, *the undecidable*, 1965, p. 116-154) sous le titre apparemment curieux : *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs Problem*. La question de la décidabilité (*entscheidung*) logico mathématique lancée par Hilbert en 1929 intéressait alors les logiciens (Gödel, Church, Post, Kleene...) et l'on ne prêta guère attention sur le champ au caractère incongru des premiers mots du titre : *Les Nombres computables*, que soixante ans plus tard on traduira en français par *nombres calculables*, en ignorant le fait qu'A. Turing avait délibérément nommé *computables* les entités, nombres, fonctions..., etc., qu'il introduisait précisément pour les différencier des nombres *calculables*.

Il précisait que ce concept de *computabilité* était équivalent au concept introduit peu avant par le logicien Church de *calculabilité effective*. Cette *effectivité*, montrait Turing, tenait au fait que la calculabilité pouvait être effectuée par une *machine* (ou avec des moyens finis), machine qu'il nommera *computing machine*, (*machine computante*), la distinguant ainsi durablement du concept de *calculating engine* (machine à calculer), remarquablement présenté en 1837 un siècle avant, par C. Babbage.

A. Church percevra aussitôt l'intérêt de ce concept apparemment fort curieux pour un logicien et le présentera sous le nom qui lui est resté depuis 1937, de *Machine de Turing*. J. Von Neumann, qui, à Princeton, connaissait aussi l'article de Turing, ne reconnaîtra son originalité et son importance que onze ans plus tard, lorsqu'il s'intéressera aux développements des premiers calculateurs électroniques aux USA et qu'il connaîtra le projet d'*Automatic Computing Engine (ACE)*, que se proposait de développer le gouvernement anglais en faisant appel au concours décisif d'A. Turing à partir de 1946. "*Turing voulait donner une définition générale de ce que l'on entend par automates computants (...). Une boîte noire qui est supposée avoir les attributs suivants : elle possède un nombre d'états finis (...) caractérisés par leur numération et leur énumération (...) et une description de la manière dont elle provoque son changement d'état (de l'état i à l'état j). Ce changement d'état nécessite quelque interaction avec le monde extérieur consistant d'un long ruban de papier (...) portant des cases (...) qui peut reculer ou avancer d'une case par unité de temps...*" (J. Von Neumann, 1946, publié en 1951, édité dans Buckley, 1968, p. 97-107). Ce ruban de papier dont chaque case peut porter un symbole digitalisé (Turing montrera qu'on peut toujours les exprimer par des séquences de 0 et de 1, notation booléenne qui manqua à Babbage) deviendra la mémoire enregistrée et enregistrante des *computers électroniques* dont J. Von Neumann venait de concevoir l'architecture, architecture qui caractérise encore celle de la plupart de nos ordinateurs, cinquante ans plus tard. Cette *mémoire* portera sur ces cases des séquences de symboles que la machine computante de Turing saura lire et recopier, sur laquelle elle saura les écrire, ou les enregistrer, qu'elle saura effacer, et sur laquelle elle saura se "brancher", en accédant à une autre case dont elle connaît l'adresse. Elle dispose ainsi de toutes les fonctions d'une machine computante sans qu'elle ait jamais à préciser si le symbole qu'elle considère est a priori une *donnée* éventuellement à transformer en changeant son *état*, ou une *règle* décrivant le changement d'état à effectuer (le *programme enregistré* dira-t-on avec J. Von Neumann). Aucune contrainte ne pèse a priori sur ces règles ou ces fonctions définissant un changement d'état. La machine de Turing pourra donc transformer aussi

bien les données qu'elle considère que les règles qu'elle leur applique. Elle peut ainsi se programmer elle-même en fonction des résultats de sa propre exécution, en définissant une *fonction effective* comme une règle qui, recevant un "argument" (par exemple un nombre ou un état), nous dit comment computer " la valeur" de la fonction pour cet argument (un état j). On peut faire exécuter effectivement par une machine ou par un automate cette *fonction computable*, qui aura alors la forme d'une séquence de symboles computables (et donc éventuellement d'un *nombre computable*, dès lors que ce nombre ou plus généralement ce symbole est digitalisé ou discret) : ce qui définit une *machine computante*. Qu'il s'agisse de déchiffrer un message codé (domaine de la *cryptologie*), de le traduire dans une autre langue, de résoudre un puzzle graphique ou cryptarithmétique, de décider d'un mouvement lors d'une partie d'échec ou de résoudre un problème d'algèbre ou de géométrie, la machine computante ne se restreint pas à l'usage de nombres arithmétiques et manipule indifféremment les symboles computables, dès qu'elle rencontre, après chaque étape, une indication sur la prochaine fonction qu'elle devra assurer. Rien ne l'assure a priori que ces fonctions la conduiront toujours au bon "résultat recherché", mais elle saura honorer son contrat de moyen.

La théorie de la computation (et aujourd'hui la pratique des machines computantes) propose ainsi un modèle général et simulable de toutes les formes de "raisonnement humain" que l'on est capable de décrire sous la forme de fonctions et de symboles computables. Faut-il préciser que ce modèle interprétable en terme de computation ne constitue pas une preuve que le raisonnement humain s'exerce effectivement et toujours en respectant ce modèle ?

En revanche, on conviendra qu'il permet de simuler empiriquement bien des raisonnements humains (ou que l'on attribue aux humains), dès lors que ces raisonnements, aussi inductifs soient-ils, peuvent être décrits par des systèmes de symboles computables.

## **COMPUTATION, INTELLIGENCE ET COGNITION.**

La théorie de la computation apparaît alors comme la palette du peintre : tant qu'il ne dispose pas d'un modèle à représenter, il ne peut rien en faire. La question de la représentation des raisonnements exprimables par l'esprit humain est aussi vieille que leur culture. Dialectique, rhétorique et logique proposent depuis longtemps des réponses souvent très familières, que les systèmes d'enseignement tentent en général de réduire à la liste des raisonnements conduisant aux résultats tenus pour bons ou vrais.

En publiant en 1854 *Les Lois de la pensée*, un traité dont "*le but est d'étudier les lois fondamentales des opérations de l'esprit par lesquelles s'effectue le raisonnement, de les exprimer dans le langage symbolique d'un calcul, puis sur un tel fondement, d'établir la science de la logique et d'en caractériser la méthode*", G. Boole annonçait un projet bien ambitieux, mais ses contemporains et ses confrères mathématiciens et logiciens ne lui tinrent pas rigueur de son immodestie. *L'algèbre de Boole* (que ce traité apportait par surcroît) est aujourd'hui familière à tous les écoliers, et sa puissance comme son économie pour exprimer sous forme symbolique toute forme de raisonnements strictement déductifs, est universellement reconnue.

Au point que la logique booléenne, devenue la logique mathématique, constitue l'archétype des bons raisonnements, voire des seuls raisonnements autorisés. On n'est pas surpris que l'Informatique (ou les sciences et les techniques des *machines computantes* selon sa désignation quasi officielle aux USA), ait, dès l'origine, cherché à exprimer les raisonnements qu'elle voulait reproduire (ou programmer) par le langage de la logique booléenne (devenue, depuis, les *Principia Mathematica* de Russell et Whitehead), la logique mathématique, voire la logique tout court. Elle trouvait là, clef en main, le moyen le plus assuré pour reproduire des raisonnements universellement acceptables, conduisant à des résultats non seulement effectivement calculables (*construits*), mais aussi logiquement vrais. Tout raisonnement pouvant être mis sous une forme algorithmique, par une séquence de règles opératoires dont on démontrait préalablement que leur application conduisait certainement au résultat recherché, s'avérait ipso facto computable, et donc programmable. La collecte des algorithmes déjà rédigés, puis la création de nouveaux algorithmes, constitua bientôt l'essentiel de l'activité noble de la science informatique, leur programmation sur des machines computantes étant affaire d'ingénierie logicielle.

A. Turing eut très tôt l'intuition de la généralité de la computation. Rien ne le contraignait à ne reproduire que des raisonnements préalablement mis sous une forme algorithmique validée, pas plus qu'à ne s'exercer que sur des nombres calculables arithmétiquement (*Systems of logic based on ordinal*, 1939, dans *The Undecidable*, 1965, p. 208-209).

Le raisonnement consiste aussi à "*aider l'intuition par des arrangements convenables de propositions, voire par des dessins et des figures (...), il peut alors prendre la forme d'investigation heuristique*" (p. 209).

Le concept de raisonnement heuristique ne prendra sa forme actuelle que peu après, introduit par G. Polya en 1945 (*How to solve it; a new aspect of mathematical method*). Mais il se présentait sous la forme d'un raisonnement computable différent du raisonnement algorithmique, en ceci seulement que la démonstration préalable de sa convergence vers le résultat cherché n'est pas acquise. Plausible sans doute dira Polya (*Les Mathématiques du raisonnement plausible*, 1952), mais pas certaine. On découvrira plus tard que le logicien américain C.S. Pierce avait dégagé ce concept de *raisonnement abductif* (qu'il empruntait à Aristote), raisonnement pouvant être mis aisément sous forme reproductible par des systèmes de symboles, et donc computables. A. Turing explorera les modalités pratiques et certaines des conséquences de cette computabilité des heuristiques dans deux articles qui vont renouveler les conceptions contemporaines de l'intelligence et de son exercice en situation mal ou pas "calculable" : *Intelligent Machinery* en 1948 et *Computing Machinery and Intelligence* en 1950, ce dernier publié dans une revue de psychologie et de philosophie, *Mind*, et accessibles aujourd'hui dans les *Collected works of A.M. Turing*, vol. 3, D.C. Ince, ed 1992. Les deux premiers pionniers de l'*Intelligence artificielle*, A. Newell et H.A. Simon, en auront connaissance dès 1952 et s'inspireront des réflexions d'A. Turing pour construire en 1956 le premier programme informatique qui, manipulant des heuristiques, produira "intelligemment" une démonstration originale d'un théorème. Ils parlaient plus volontiers à l'époque d'*heuristiques programmables* que "d'intelligence artificielle", mais c'est ce néologisme qui fut retenu par l'usage, suscitant bon nombre de réactions de rejet viscéral, qui retardèrent pendant près de quinze ans les développements de la théorie de la computation, la confinant dans une théorie locale de la calculabilité. Un article de synthèse d' A. Newell : *Heuristic programming : ill-structured problem*,

publié en 1969 (dans *Progress in O.R.*, vol III, ed. J. Aronossky, p. 361-414) donne une bonne synthèse de ce que fut l'expérience acquise par la programmation informatique des raisonnements heuristiques durant cette période.

Ces expériences allaient susciter une sorte de maturation épistémologique que jalonnent quelques textes que l'on tient toujours pour influents. En 1963, paraît le recueil édité par Feigenbaum et Feldman, *Computers and Thought*, qui sera souvent réédité pendant trente ans, publiant les textes clefs d'A. Turing, d'H.A. Simon et A. Newell, de M. Minsky... etc., le flambeau étant repris en 1995 par le recueil édité par G. Luger : *Computation and Intelligence*, qui intègre les importantes pièces nouvelles sur la représentation des connaissances et le raisonnement en situation complexe. En 1969, paraît *The Sciences of the Artificial* d'H.A. Simon, bientôt complété par la *Conférence Turing* (1975), d'A. Newell et d'H.A. Simon, qui proposera une discussion épistémologique fort constructive de la théorie de la computation : *Computerscience as Empirical Inquiry, Symbol and Search (Communication of the A.C.M., March 1976*, repris dans G. Luger, 1995, p. 91-120).

Un des intérêts de cette discussion est de reconsidérer le concept de *symbolisation* sur lequel, depuis A. Turing, la science informatique et la logique symbolique ne s'étaient sans doute pas assez interrogées. En proposant de tester empiriquement *l'hypothèse dite du "système de symbole physique"*, ils suggèrent de remplacer le concept de symbole considéré comme un objet (ou un jeton) par le concept plus complexe à formaliser, mais interprétable, de *fonction computante* ou de processus de computation, le symbole s'entendant alors comme un *système computant des symboles*, y compris récursivement lui-même. (H. Von Foerster explorera plus avant cette hypothèse de récursivité dans *Objects: Tokens for (eigen) Behaviours*, 1976, publié dans *Observing systems*, 1981, p. 273-286).

Ces discussions ouvrent la voie à une théorie de la computation symbolique qui serait aussi une théorie de la symbolisation computante, proposant une interprétation épistémique des rapports de la représentation et de la connaissance "raisonnable" dans le cadre de la dialectique millénaire du faire et du savoir.

Aussi n'est-on pas surpris d'observer la conjonction contemporaine des théories de la computation et des théories de l'intelligence au sein des *sciences de la cognition*, dont les paradigmes émergent au début des années 80. L'impérialisme initial des théories connexionnistes de la cognition qui aspirent à représenter fidèlement toute forme de raisonnement sans faire appel aux théories de la computation symbolique, s'est très rapidement atténué (ne serait-ce que parce que leur expérimentation sur machine s'exprime nécessairement sous la forme de fonctions computables).

On peut présumer que la modélisation et la simulation de processus de récursion auto-organisatrice continuera à mobiliser toutes les ressources de l'intelligence, qu'elles soient réactives (ou connexionnistes), ou créatives (ou computationnelles). La conception de systèmes symboliques riches et l'élaboration d'heuristiques investigatrices originales seront sûrement précieuses pour établir des représentations plausibles et intelligibles de ces systèmes téléologiques complexes que sont les êtres humains en société raisonnant leurs comportements.

## COMPUTATION ET COMPLEXITÉ

L'exercice d'une computation sur machine (l'exécution d'un programme informatique) s'exerce par construction dans le temps : des séquences d'étapes de changement d'état de symboles computables. Même si le raisonnement représenté s'exprime par un algorithme dont on a au préalable montré que l'enchaînement des opérations élémentaires qu'il prescrit conduira certainement au résultat annoncé, il arrivera souvent qu'en pratique, la computation de cet algorithme requiert une durée insupportable et une capacité de mémorisation irréalisable. L'exemple de l'algorithme qui permettrait de gagner à coup sûr au jeu d'échec est souvent cité. Il consiste à décrire pas à pas l'arbre des mouvements possibles pour chaque joueur successivement. Aisé à écrire, il est impossible à exécuter en pratique, la computation du "bon choix" à chaque pas requérant plusieurs décennies pour computer les quelques  $10^{120}$  mouvements ultérieurs possibles, les évaluer et les comparer. (*Deepest blue* parvient à évaluer environ  $10^5$  positions à la seconde en 1996, ce qui ne lui permet d'explorer l'arbre que sur une "profondeur" de dix noeuds).

Ces *limites de capacité computationnelles* sont d'autant plus contraignantes en pratique qu'on ignore a priori lorsqu'on commence la computation d'un algorithme sur machine, ce que sera la durée de son exécution : convergera-t-il rapidement ou lentement vers le résultat cherché ? Ne peut-on disposer de quelque critère permettant de la prédire avant de se lancer dans sa programmation, qui peut requérir éventuellement plusieurs millions d'instructions élémentaires, puis de son exécution qui peut demander quelques minutes ou plusieurs siècles ?

Logiciens et informaticiens ont beaucoup étudié depuis trente ans cette question de la *complexité des algorithmes* ( et plus généralement de la *complexité computationnelle*), les considérations économiques de coût de la computation et de coût des erreurs de programmation les y incitant. On doit à A. Kolmogoroff en Russie, et à G. Chaitin aux USA, les premières formulations du concept de *complexité algorithmique* par la mesure de la longueur du plus petit programme qui permette de reconstruire la représentation d'un raisonnement computable (par exemple si la représentation est donnée sous la forme de 10 lettres a et 10 lettres b dans le désordre, il faudra énumérer les 20 lettres baabbbaba... etc., pour la reconstruire ; si elle est donnée sous la forme ababab... etc., on pourra la décrire par l'expression plus courte : 8 fois ab).

La résolution du même problème pouvant souvent être déterminée par des algorithmes différents, on sera fort incité à rechercher les algorithmes de moindre "complexité", en les caractérisant par un indicateur de "longueur" (nombre d'instructions élémentaires), plutôt que par un indicateur de durée effective d'exécution, cette dernière dépendant de la "puissance" de la machine utilisée (laquelle augmente sensiblement chaque année). A. Turing l'avait d'ailleurs montré dès 1947 : "*La complexité de la computation est concentrée sur la bande* (qui porte le description du programme) *et non sur la machine proprement dite*" (*Collected Works*, III, p. 93).

Ces études sur la complexité de théories de l'algorithme que l'on appelle souvent les théories logiques, sont en général présentées sous le nom de *théories de la complexité*, abrégé inadéquat qui masque parfois les développements des sciences de la complexité dont elles ne constituent qu'une composante. Elles ont conduit à dégager deux notions qui forment aujourd'hui l'essentiel de la théorie de la complexité algorithmique, connue sous le nom "*P, NP*", P pour *Polynomial*, et NP pour *Non-Polynomial*, exponentiel par

exemple : si  $n$  est le nombre d'instructions et de données élémentaires décrivant l'algorithme, on établira une échelle de complexité croissante de cet algorithme, en considérant la longueur de la bande utilisée par la machine de Turing théorique qui pourrait la computer. Si cette longueur (exprimant une durée théorique de la computation) s'exprime par une fonction polynomiale du nombre  $n$ , l'algorithme sera dit de "complexité de type P" ; si sa valeur est supérieure, elle sera dite "de type NP". Un algorithme de type NP n'est pas a priori effectivement computable par des moyens aujourd'hui concevables. Il ne suffit donc pas d'avoir établi des algorithmes dont on a "démontré" qu'ils sont de type *décidables* (au sens de Hilbert-Gödel) convergeant de façon certaine vers le résultat annoncé. Il faut aussi montrer qu'ils sont effectivement *computables*. Leur *complexité* devra être de type P bornée par une fonction polynomiale de leur représentation minimale.

Et même dans ce cas, on ne sera pas toujours certain de parvenir effectivement à un résultat acceptable : la complexité de type P n'est pas encore bien explorée. Comment être certain a priori qu'un programme d'un million d'instructions ne contient plus d'erreurs alors qu'on est quasi certain d'en avoir introduit par mégarde en l'écrivant ou en le recopiant, même si celui-ci fonctionne de façon apparemment satisfaisante lors des premiers essais ?

L'expérience de l'intelligence artificielle et la programmation des heuristiques a suscité d'autres voies de recherche plus pragmatiques, dans le domaine de la *computation effective*. L'observation des comportements raisonnés des humains, qui conviennent tous des contraintes que leur imposent les limites de leurs propres capacités computationnelles, conduit à de nombreuses investigations fructueuses dans lesquelles les logiques déductives ont peu de part.

Le raisonnement humain permet l'élaboration d'*inférences rusées et plausibles*, qui, mobilisant de multiples ressources disponibles mais non initialement décrites, et de nombreuses *routines* établies au fil d'expériences multimillénaires (routines que décrivent par exemple maximes, proverbes et autres conventions), vont s'avérer sinon efficaces au moins effectives : on n'a peut-être pas résolu exactement le problème que l'on se posait, mais on a résolu, dans une durée tenue pour acceptable, et de façon tenue pour satisfaisante, le problème que l'on souhaite maintenant considérer, lequel n'est pas nécessairement identique au problème de départ.

Ces modes de raisonnement rusés sont reproductibles et représentables sous formes computables (des séquences de règle appliquée à des symboles) et pourront donc être programmées.

Une étude célèbre de P. Langley et H.A. Simon, ed, intitulée : "*Scientific discovery, computational exploration of the creative processes*" (1987), illustrera ceci dans le cas familier de quelques découvertes scientifiques classiques, *productions courageuses et modestes* de raisonnements intentionnels de type tâtonnant. Heuristiques reproductibles qui affecteront tour à tour les représentations du problème et les représentations des raisonnements.

Exercices de rationalité de type dialectique ou plausible ou récursive, que J.B. Grize (1983) proposera d'appeler *logique naturelle* par contraste et par complément avec celle, déductive, de la *logique mathématique* : raisonnements abductifs (C.S. Peirce), ou plausibles (G. Polya), ou heuristiques (D. Lénat, J.L. Laurière), qui sont aisément représentables sous formes de règles ou de fonctions computables. Ainsi, par exemple,

les *Productions* au sens de E. Post, que l'on utilise dans nombre de *systèmes experts*, sous la forme "si... (telle condition), alors... (telle action)".

On ne peut pas dire de ces formes de raisonnements rusés qu'elles ont été conçues pour contourner *le mur de la complexité algorithmique* que symbolise la transition *P-Non P*, puisqu'elles furent élaborées bien avant que la logique déductive qui le construisit ne fut formalisée. "*La Métis des Grecs, ou les ruses de l'intelligence*" (M. Detienne et J.P. Vernant, 1974) est bien une forme computable puisque communicable "*d'intelligence et de pensée (...) ensemble complexe, mais très cohérent, d'attitudes mentales, de comportements intellectuels qui combinent le flair, la sagacité, la prévision, la souplesse d'esprit, la feinte, la débrouillardise, l'attention vigilante, le sens de l'opportunité*" (p. 10).

La limitation des capacités computationnelles de l'esprit humain fut mère de l'invention, et les raisonnements téléologiques de type heuristique s'avèrent souvent fort pertinents pour élaborer des comportements réfléchis en situation complexe, raisonnements ingénieux que nous pouvons communiquer et exercer commodément en les mettant sous forme computable (A. Turing le soulignant dès 1939 dans *Collected works*, T. 3, p. 209).

Parmi ces dispositions ingénieuses, il faut mentionner celles dégagées par l'Intelligence artificielle sur la question jusqu'alors peu explorée par la logique algorithmique de la *représentation des connaissances* pour pouvoir les computer sans les réduire a priori. Les contributions sur ce thème d'A. Newell, introduisant le concept de *knowledge level* en 1982 et les techniques mnémoniques du *chunking* en 1981 (A. Newell, *Unified theories of cognition*, 1990), ou celles de J. Pitrat développant le concept de *Métacognition* (1990), constituent deux des illustrations les plus convaincantes de ces développements à l'interface des théories de la computation et de la symbolisation.

## COMPUTATION ET RÉCURSIVITÉ AUTO-ORGANISANTE

Le passage d'un paradigme du calcul arithmétique à celui du paradigme de la computation symbolique que provoqua l'introduction du concept de *nombre (et de fonction) computable* par A. Turing en 1936 allait prendre sa pleine mesure en 1976 par une célèbre paraphrase d'une formule de W. Mac Culloch, proposée par A. Newell et H.A. Simon, dans leur *Conférence Turing* :

"*Qu'est-ce qu'un nombre, qu'un homme peut connaître, et un homme qui peut connaître un nombre ?*" (alors même que peut-être ses neurones commettent des erreurs !) interrogeait W. Mac Culloch en 1961 par l'article célèbre ayant ce titre (1965, p. 1-18) ; formule qu'A. Newell et H.A. Simon proposaient en 1970 de généraliser :

"*Qu'est-ce qu'un symbole, que l'intelligence peut utiliser, et l'intelligence qui peut utiliser un symbole ?*" (in G. Luger, 1995, p. 94).

Ce passage du *nombre calculable* et de *l'homme calculant* au *symbole computable* et à *l'intelligence computante* exprime peut-être l'argument essentiel de la théorie de la computation. Le nombre ne pouvait transformer le calculateur qui le transformait, alors que le symbole s'entend par sa capacité fonctionnelle à transformer le symbole qui vient de le transformer. Le symbole, organisé (une séquence de digit), devient organisant par sa capacité à exercer récursivement sa fonction sur l'opérateur qui le transforme. Ce mode de représentation du raisonnement récursif ("*quoique le computer ait computed, il ne sera plus jamais le même*") par les symboles computables, suggère déjà d'autres

interprétations des théories de la computation, en particulier dans l'interprétation des phénomènes d'auto-organisation. Formulée par H. Von Foerster en 1959 et 1974 (*Observing Systems*, 1980, p. 1, 24 et p. 273-286 ), elle sera reprise par E. Morin (*La Méthode*, T. II, p. 184, et T. III, p. 123) sous le nom de "*l'hypothèse du computo*" pour rendre compte intelligiblement de phénomènes biologiques et cognitifs d'auto-organisation.

## BIBLIOGRAPHIE

- **Abu-Mostafa Y. S.**, *Complexity in Information Theory*, New York, Springer-Verlag, 1988.
- **Boole G.**, *Les Lois de la pensée*, (1854), texte angl., trad. fr. S. Diagne, Paris, Vrin-Mathesis, 1992 ; *The Laws of Thought*, .
- **Davis M.**, *The Undecidable. Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvability Problems and Computable Functions*, New York, Raven Press, 1965.
- **Dehornoy P.**, *Complexité et décidabilité*, Paris, Springer Verlag, 1993.
- **Detienne M., Vernant J.P.**, *Les Ruses de l'intelligence, la métis des Grecs*, Paris, Flammarion, 1974.
- **Dewey J.**, *Logique, la théorie de l'enquête* (1938), texte angl., trad. fr. et présentation G. Deledalle, Paris, PUF, 1967, rééd. 1993.
- **Feigenbaum E., Feldman J.**, *Computers and Thought*, New York, Mc Graw Hill, 1963.
- **Green D., Bossomaier T.**, *Complex Systems, from Biology to Computation*, Amsterdam, I.O.S. Press, 1993.
- **Grize J.-B.**, *Logique naturelle et communication*, Paris, PUF, 1996.
- **Hodges A.**, *Alain Turing, the Enigma*, New York, Simon and Schuster, 1983.
- **Hyman A.**, *Charles Babbage, Pioneer of the Computer*, New Jersey, Princeton University Press, 1982.
- **Largeault J.**, *Intuitionisme et théorie de la démonstration* (textes de Bernays, Brouwer, Gentzen, Gödel, Hilbert, Kreisel, Weige), Paris, Vrin, 1992.
- **Le Moigne J.-L.**, *Intelligence des mécanismes et mécanismes de l'intelligence*, Paris, Fayard « Fondation Diderot », 1986.
- **Luger G. F.**, *Computation and Intelligence. Collected Readings*, Cambridge Mass., The MIT Press, 1995.
- **Minsky M.**, *Computation. Finite and Infinite Machines*, Englewood Cliffs New Jersey, Prentice Hall Inc., 1967
- **Newell A.**, Heuristic Programming : Ill-structured Problems, in J.S. Aronofsky, *Progress in Operations Research. Relationship between O.R. and the Computer*, vol. 3, New York, J. Wiley and Son, 1969, pp. 361-414 ; *Unified Theories of Cognition*, Cambridge Mass., Harvard University Press, 1990.

- **Newell A., Simon H. A.**, Computer Science as an Inquiry : Symbol and Search, dans *Communication of the A.C.M.*, March 1976, vol. 19 n° 3, p. 113-126
- **Pagels H.**, *The Dreams of Reason*, 1988 ; trad. fr. M. Garène, *Les Rêves de la raison. L'ordinateur et les sciences de la complexité*, Paris, Inter Editions, 1990.
- **Pitrat J.**, *Métaconnaissance, futur de l'intelligence artificielle*, Paris, Hermès, 1990.
- **Polya G.**, *Mathematics and Plausible Reasoning*, vol. 1 : *Induction and Analogy in Mathematics*, Princeton, Princeton University Press, 1954 ; vol. 2 : *Patterns of Plausible Inference*, Princeton, Princeton University Press, 1954 ; trad. franç. R. Vallée, *Les Mathématiques et le raisonnement plausible*, Paris, Gauthiers-Villars, 1958.
- **Polya G.**, *How to solve it. A New Aspect of Mathematical Method*, Princeton University Press, 1945, rééd. New York, Doubleday Anchor Books, 1957 ; trad. franç. Mesnage, Paris, Dunod, 1962.
- **Pylyshyn Z. W.**, *Computation and Cognition. Toward a Foundation for Cognitive Science*, Cambridge Mass., The MIT Press, « Bradford Book », 1986
- **Simon H. A.**, Langley P., Bradshaw G. L., Zytkow J. M., *Scientific Discovery. Computational Explorations of the Scientific Processes* (P. Langley est mentionné comme premier auteur), Cambridge Mass., The MIT Press, 1987.
- **Turing A. M.**, *Collected Works*, vol. 3 : *Mechanical Intelligence*, North Holland Amsterdam, D.C. Ince, 1992 ; Computing Machinery and Intelligence, in *Mind*, 1950, vol. LIX, n° 236 ; trad. franç. dans A.R. Anderson éd., *Pensée et machine*, F01420 Seyssel, Champvallon, 1983, p. 39-67
- **Von Neumann J.**, *The General and Logical Theory of Automate*, 1948-51, dans W. Buckley, 1968 ; trad. franç. J. Miermont et D. Ernst in *Piste*, oct. 1992, n° 3, p. 9-24 ; *The Computer and the Brain*, Yale University Press, 1958 ; trad. franç. D. Pignon, *L'Ordinateur et le cerveau*, Paris, La Découverte, 1992.

## CORRÉLATS

Algorithmique, Auto-organisation, Complexité, Cognition, Dialectique, Heuristique, Informatique, Intelligence, Intelligence artificielle, Logique naturelle, Mémorisation, Métis, Newell A., Peirce C.S., Polya G., Récursivité, Rhétorique, Sciences de la cognition, Système, Système expert, Turing A., Von Neuman J..

<**BIBLIOGRAPHIE**> Abu-Mostafa Y. S., *Complexity in Information Theory*, New York, Springer-Verlag, 1988. — Boole G., *Les Lois de la pensée*, (1854), texte angl., trad. fr. S. Diagne, Paris, Vrin-Mathesis, 1992 ; *The Laws of Thought*, . — Davis M., *The Undecidable. Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvability Problems and Computable Functions*, New York, Raven Press, 1965. — Dehornoy P., *Complexité et décidabilité*, Paris, Springer Verlag, 1993. — Detienne M., Vernant J.P., *Les Ruses de l'intelligence, la métis des Grecs*, Paris, Flammarion, 1974. — Dewey J., *Logique, la théorie de l'enquête* (1938), texte angl., trad. fr. et présentation G. Deledalle, Paris, PUF, 1967, rééd. 1993. — Feigenbaum E., Feldman J., *Computers and Thought*, New York, Mc Graw Hill, 1963. — Green D., Bossomaier T., *Complex Systems, from Biology to Computation*, Amsterdam, I.O.S. Press, 1993. — Grize J.-B., *Logique naturelle et communication*, Paris, PUF, 1996. — Hodges A., *Alain Turing, the Enigma*, New York, Simon and Schuster, 1983. — Hyman A., *Charles Babbage, Pioneer of the Computer*, New Jersey, Princeton University Press, 1982. — Largeault J., *Intuitionisme et théorie de la démonstration* (textes de Bernays, Brouwer, Gentzen, Gödel, Hilbert, Kreisel, Weige), Paris, Vrin, 1992. — Le Moigne J.-L., *Intelligence des mécanismes et mécanismes de l'intelligence*, Paris, Fayard « Fondation Diderot », 1986. — Luger G. F., *Computation and Intelligence. Collected Readings*, Cambridge Mass., The MIT Press, 1995. — Minsky M., *Computation. Finite and Infinite Machines*, Englewood Cliffs New Jersey, Prentice Hall Inc., 1967 — Newell A., Heuristic Programming : Ill-structured Problems, in J.S. Aronofsky, *Progress in Operations Research. Relationship between O.R. and the Computer*, vol. 3, New York, J. Wiley and Son, 1969, pp. 361-414 ; *Unified Theories of Cognition*, Cambridge Mass., Harvard University Press, 1990. — Newell A., Simon H. A., Computer Science as an Inquiry : Symbol and Search, dans *Communication of the A.C.M.*, March 1976, vol. 19 n° 3, p. 113-126 — Pagels H., *The Dreams of Reason*, 1988 ; trad. fr. M. Garène, *Les Rêves de la raison. L'ordinateur et les sciences de la complexité*, Paris, Inter Editions, 1990. — Pitrat J., *Métaconnaissance, futur de l'intelligence artificielle*, Paris, Hermès, 1990. — Polya G., *Mathematics and Plausible Reasoning*, vol. 1 : *Induction and Analogy in Mathematics*, Princeton, Princeton University Press, 1954 ; vol. 2 : *Patterns of Plausible Inference*, Princeton, Princeton University Press, 1954 ; trad. franç. R. Vallée, *Les Mathématiques et le raisonnement plausible*, Paris, Gauthiers-Villars, 1958. — Polya G., *How to solve it. A New Aspect of Mathematical Method*, Princeton University Press, 1945, rééd. New York, Doubleday Anchor Books, 1957 ; trad. franç. Mesnage, Paris, Dunod, 1962. — Pylyshyn Z. W., *Computation and Cognition. Toward a Foundation for Cognitive Science*, Cambridge Mass., The MIT Press, « Bradford Book », 1986 — Simon H. A., Langley P., Bradshaw G. L., Zytkow J. M., *Scientific Discovery. Computational Explorations of the Scientific Processes* (P. Langley est mentionné comme premier auteur), Cambridge Mass., The MIT Press, 1987. — Turing A. M., *Collected Works*, vol. 3 : *Mechanical Intelligence*, North Holland Amsterdam, D.C. Ince, 1992 ; Computing Machinery and Intelligence, in *Mind*, 1950, vol. LIX, n° 236 ; trad. franç. dans A.R. Anderson éd., *Pensée et machine*, F01420 Seyssel, Champvallon, 1983, p. 39-67 — Von Neumann J., *The General and Logical Theory of Automate*, 1948-51, dans W. Buckley, 1968 ; trad. franç. J. Miermont et D. Ernst in *Piste*, oct. 1992, n° 3, p. 9-24 ; *The Computer and the Brain*, Yale University Press, 1958 ; trad. franç. D. Pignon, *L'Ordinateur et le cerveau*, Paris, La Découverte, 1992.

<**CORRÉLATS**> Algorithmique, Auto-organisation, Complexité, Cognition, Dialectique, Heuristique, Informatique, Intelligence, Intelligence artificielle, Logique

naturelle, Mémorisation, Métis, Newell A., Peirce C.S., Polya G., Récursivité, Rhétorique, Sciences de la cognition, Système, Système expert, Turing A., Von Neuman J..

<**BIBLIOGRAPHIE**> Ashby W.R., *An Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman and Hill Ltd, 1956. — Atias C., Le Moigne J.-L. (éd.), *Science et conscience de la complexité* ; avec E. Morin, Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, 1984. — Bachelard G., *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934, 1980. — Bateson G., *Steps to an Ecology of Mind*, New York, Chandler Pub. Cy, 1972 ; trad. fr., *Vers une Ecologie de l'esprit*, 2 vol., Paris, Seuil, 1977-1980. — Bocchi G.L., Ceruti M. (éd.), *La Sfida della complessità*, Milano, Feltrinelli, 1985. — Bonabeau E., Théraulaz G. (éd.), *Intelligence collective*, Paris, Hermès, « Systèmes Complexes », 1994. — CERISY (Colloque de), *Les Théories de la complexité, autour de l'œuvre d'Henri Atlan*, Seuil, 1991. — Descartes R., *Œuvres et lettres*, textes présentés par A. Bridoux, Paris, NRF-Pléiade, 1953. — Dupuy J.-P., *Ordres et désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, Seuil, 1982 ; *Aux Origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1994. — Ekeland I., *Au Hasard. La chance, la science et le monde*, Paris, Seuil, 1991. — Gell-Mann M., texte américain, 1994 ; trad. franç. G. Minot, *Le Quark et le jaguar. Voyage au cœur du simple et du complexe*, Paris, Albin Michel, 1995. — Glansdorff P., Prigogine I., *Structure, stabilité et fluctuations*, Paris, Masson et Cie, 1971. — Gleick J., texte anglais, 1987 ; trad. franç. C. Jeanmougin, *La Théorie du chaos. Vers une nouvelle science*, Paris, Albin Michel, 1989. — Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis, with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975. — Kuhn T.S., *The Structure of the Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, 1962-1970 ; trad. franç., *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983. — Langton C.G. (ed.), *Artificial Life*, Santa Fe Institute Studies, Addison Wesley Pub. Cy, 1990. — Le Moigne J.-L., *La Modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod, 1990, 2e éd., 1995 ; *The Intelligence of Complexity*, in *The Science and Praxis of Complexity*, Tokyo, United Nations University (ed.), 1985, p. 35-61 ; *On theorizing the Complexity of Economic systems*, *The Journal of Socio Economics*, JAI Press, Fall 1995. — Lewin R., texte américain, 1993 ; trad. franç. B. Loubières, *La Complexité. La théorie de la vie au bord du chaos*, Paris, InterEditions, 1994. — Morin E., *La Méthode. Tome I : La Nature de la nature*, Paris, Seuil, « Point », 1977 ; *La Méthode. Tome II : La Vie de la vie*, Paris, Seuil, « Point », 1980 ; *La Méthode. Tome III : La Connaissance de la connaissance*, vol. 1, Paris, Seuil, 1987 ; *La Méthode. Tome IV : Les Idées, leur habitat, leur vie, leurs mœurs, leur organisation*, Paris, Seuil, 1991 ; *Science avec conscience. Nouvelle édition complétée*, Seuil, « Point », 1990 ; *Introduction à la pensée complexe*, Paris, ESF, « Communication et Complexité », 1990. — Morin E., Piatelli-Palmarini M. (éd.), *L'Unité de l'Homme*. 3 tomes : *I. Le Primate et l'Homme*, *II. Le Cerveau humain*, *III. Pour une Anthropologie fondamentale*, Paris, Seuil, « Points », 1974. — Mugur-Schächter M., *Les Leçons de la mécanique quantique ; vers une épistémologie formelle*, *Le Débat*, mars 1997, n° 93. — Nicolis G., Prigogine I., texte anglais 1989, trad. fr. sous la dir. de J. Chanu, *A la Rencontre du complexe*, Paris, PUF, 1992. — Prigogine I., *La Fin des certitudes*, Paris, Odile Jacob, 1996. — Prigogine I., Stengers I., *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard-NRF, 1979. — Quastler H., *The Emergence of Biological Order*, Yale University Press, 1964. — Ruelle D., *Hasard et chaos*, Paris, Odile Jacob, 1991. — Shannon C.E., Weaver W., *The Mathematical Theory of Communication*, Chicago, University of Illinois Press, 1949 ; trad. franç., Paris, éd. RETZ-CEPL, 1975. — Simon H.A., *The Sciences of the Artificial*, 1961, 2nd ed. augmented, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1981, 3e éd. complétée non encore traduite, 1996 ; trad. franç., *Science des systèmes, sciences de l'artificiel*, Paris, Dunod, 1990 ; *Models of Bounded Rationality*, 2 vol., Cambridge,

Mass., The MIT Press, 1982. — Stein D.L. (ed.), *Lectures in the Sciences of Complexity* (Lectures vol. I), Santa Fe Institute Studies, Addison-Wesley Pub. Cy, « The Sciences of Complexity Serie », 1989. — U.N.U.-IDATE (Université des Nations Unies), *Science et pratique de la complexité*, Paris, La Documentation Française, 1987. — Valéry P., *Cahiers 1894-1945*, 2 vol., Paris, Gallimard-NRF, « Pléiade », 1973 ; *Œuvres complètes*, 2 vol., Paris, Gallimard-NRF, « Pléiade », 1972. — Weaver W., Science and Complexity, in *American Scientist*, 1948, vol. 36, p. 536-544. — Weisbuch G., *Dynamique des systèmes complexes*, Paris, Inter Édition, 1989.

<CORRÉLATS> Adaptation, Algorithme génétique, Attracteurs étranges, Bachelard G., Catastrophe, Causalisme, Chaos, Computation, Constructivisme, Décision, Descartes R., Dialogique, Dynamique, Émergence, Entropie, Équilibration, Fractal, Information, Ingénierie, Intelligence, Irréversibilité, Mécanique statistique, Modélisation, Morin E., Morphogenèse, Organisation, Paradigme, Physiologie, Positivisme, Prigogine I., Rationalité, Récursivité, Système, Shannon C., Simon H.A., Stratégie, Téléologie, Valéry P., Weaver W., Wiener N..

<**BIBLIOGRAPHIE**> Andreevsky E. (et Coll.), *Systémique et cognition*, Paris, Dunod, « AFCET-Système », 1991. — Atlan H., *L'Organisation biologique et la théorie de l'information*, Paris, Hermann, 1972. — Barel Y., *Le Paradoxe et le système. Essai sur le fantastique social*, 1979 ; *Le Paradoxe et le système. Essai sur le fantastique social. Nouvelle édition augmentée*, Grenoble, P.U.G., 1989. — Barel Y. (ouvrage collectif), *Système et paradoxe, autour de la pensée d'Yves Barel*, Paris, Seuil, 1993. — Bateson G., Texte américain colligé par R.E. Donaldson, 1991 ; trad. fr. J.J. Wittezaele, *Une Unité sacrée - quelques pas de plus vers une écologie de l'esprit*, Paris, Seuil, 1996. — Beer S., *Platform for Change*, New York, J. Wiley and Sons, 1975 — Bogdanov A., *Essays in Tektology (1913-20)*, trad. angl. G. Gorelik, Seaside, Cal., Intersystems Publication, 1980. — Boulding K., *The Image*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1956. — Buckley W. (Ed.), *Modern Systems Research for the Behavioral Scientist*, Chicago, Aldine Publishing Cy, 1968. — Cellerier G., Papert S., Voyat G., *Cybernetique et épistémologie*, Paris, PUF, 1968. — Churchman C.W., *The Design of Enquiring Systems*, New York, Basic Book Pub., 1971. — Condillac E., *Traité des systèmes (1749-1798)*, Paris, Fayard (Corpus des œuvres de philosophie), 1991. — Crozier M., Friedberg E., *L'Acteur et le système*, Paris, Seuil, 1977. — Delattre P., *Système, structure, fonction, évolution*, Paris, Maloine, 1971, 2e éd., 1985. — Dumonchel P., Dupuy J.-P. (Ed.), *L'auto-organisation. De la physique au politique*, Paris, Seuil, 1983. — Fontanet J., *Le social et le vivant*, Paris, Plon, 1977. — Forrester J. W., texte américain, 1965 ; trad. fr. P.S. Baron, *Principes des systèmes*, Lyon, Presses Universitaires de Lyon, 1980. — Gray W., Rizzo N. (Ed.), *Unity through Diversity - a Festschrift for L. Von Bertalanffy*, 2 tomes, New York, Gordon and Breach, 1973. — Hofstadter D.R., *Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid*, New York, Basic Book, 1979 ; trad. fr., Paris, Inter Edition, 1985. — Jacob F., *Le Jeu des possibles*, Paris, Fayard, 1981. — Kant E., *Critique de la faculté de juger (1793, trad. inédite A. Renault)*, Paris, Aubier, 1995. — Katsenelinboigen A., *Some New Trends in Systems Theory*, Salinas, Cal., Intersystems Publications, « The Systems Inquiry Series », 1984. — Klir J., Valach M., *Cybernetic Modeling*, London, Cliffe Books Ltd, 1966. — Klir G.J., *Facets of Systems Science*, New York, Plenum Press, 1991. — Koestler A., Smythies J., *Beyond Reductionism*, London, The Hutchinson Pub. Ltd, 1969. — Largeault J., *Systèmes de la nature*, Paris, J. Vrin, 1985. — Laszlo E., *Le Systémisme, vision nouvelle du monde*, Paris, Pergamon Press, 1981. — Le Moigne J.-L., *La Théorie du système général, théorie de la modélisation*, Paris, PUF, 2e éd. augmentée, 1977, 4e éd. complétée, 1994 ; *Le Constructivisme. Tome I : Des Fondements ; Tome II : Des Epistémologies*, Paris, ESF, 1994-1995 ; Sur la Capacité de la raison à discerner la rationalité substantive et la rationalité procédurale, dans J.C. Passeron et L.A. Gérard-Varet (Eds), *Calculer et raisonner, les usages du principe de rationalité dans les sciences sociales*, Paris, Editions de l'E.H.E.S.S., 1993, chap. 2. — Lerbet G., *Système, personne et pédagogie. Une Nouvelle voie pour l'éducation*, Paris, ESF, 2e éd. augmentée, 1993. — Lesourne J. (Ed.), *La Notion de système dans les sciences contemporaines*, 2 vol., Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, 1981. — Lichnerowicz A., Perroux F., Gadoffre G. (Eds), *L'Idée de régulation dans les sciences*, Paris, Maloine Doin, « Recherches Interdisciplinaires », 1977. — Mattesich R., *Instrumental Reasoning and Systems Methodology*, Dordrecht, Holland, D. Reidel Pub. Cy, 1978. — Maturana H., Varela F., *Autopoïesis and Cognition : the Realization of the Living*, Boston, D. Reidel, 1980. — McCulloch W.S., *Embodiments of Mind*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1965, 2e éd. 1988. — Mèlèse J., *Approches systémiques des organisations*, Paris, Ed. Hommes et Techniques, 1979. — Mesarovic

M.D., Macko D., Takara Y., *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*, New York, Academic Press, 1970. — Miermont J., *L'Homme autonome, éco-anthropologie de la communication*, Paris, Hermès, coll. « Systèmes Complexes » (sous la dir. de P. Bourguine et E. Bonabeau), 1995. — Morin E., *Le Paradigme perdu : la nature humaine*, Paris, Seuil, 1973 ; *La Méthode*, tome I, Paris, Seuil, 1977. — Mugur-Schächter M., Les leçons de la mécanique quantique. Vers une Epistémologie formelle, *Le Débat*, mars-avril 1997, n° 94, p. 169-192. — Orillard M. et Le Moigne J.-L. (Ed.), Systémique et complexité, Numéro spécial de la *Revue Internationale de Systémique*, 1990, vol. 4, n° 2. — Piaget J., *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard, « Encyclopédie de la Pléiade », 1967. — Robinson-Valéry J. (Ed.), *Fonctions de l'esprit : treize savants redécouvrent Paul Valéry*, Paris, Hermann, 1983. — De Rosnay J., *Le Macroscopie, vers une vision globale*, Paris, Seuil, « Point », 1975. — Schoderbek P., *Management Systems*, New York, J. Wiley and Sons, 1967. — Segal L., Textes anglais et allemands, 1986 ; trad. fr. A.L. Hacker, *Le Rêve de la réalité. Heinz Von Foerster et le constructivisme*, Paris, Seuil, 1990. — Simon H.A., *Administrative Behavior, a Study of the Decision-Making Process in Administrative Organization*, New York, Mac Millan Pub. Cy, « The Free Press », 1945-1947, 3rd ed. expanded, 1976 ; *Reason in Human Affairs*, Californie, Stanford University Press, 1983. — Tassy P. (Ed.), *L'Ordre et la diversité du vivant. Quel statut scientifique pour les classifications biologiques ?*, Paris, Fayard, « Fondation Diderot », 1986. — Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse, essai d'une théorie générale des modèles*, Paris, Ed. W.A. Benjamin, Reading U.S.A., Diffusion Ediscience, 1972. — Tinland F. (Ed.), *Systèmes naturels et systèmes artificiels*, Seyssel, Ed. Champvallon, « Coll. Milieux », 1991. — Trapp R., Horn W., Klir G.J., *Basic and Applied General Systems Research : A Bibliography 1977-1984*, New York, Hemisphere Pub. Corp., 1985. — Valéry P., *Cahiers 1894-1914*, édition intégrale annotée sous la direction de N. Celeyrette-Pietri et J. Robinson-Valéry, Paris, Ed. Gallimard, vol. I, 1987 ; vol. II, 1988 ; vol. III, 1990 ; vol. IV, 1992. — Van Gigch J.P., *Applied General Systems Theory*, New York, Harper and Row, Pub., 1974. — Varela F.J., *Principles of Biological Autonomy*, New York, North Holland Pub. Cy, 1979. — Von Bertalanffy L., *Théorie générale des systèmes*, traduit de l'américain, Paris, Ed. Dunod, 1968-1973 ; texte allemand, 1948, trad. fr. M. Deutsch, *Les problèmes de la vie. Essai sur la pensée biologique moderne*, Paris, Gallimard, 1961. — Von Foerster H., *Observing Systems, with an Introduction by F.J. Varela*, Seaside, Cal., Intersystems Publications, 1st ed., 1981 ; 2nd ed., 1984. — Vullierme J.L., *Le Concept de système politique*, Paris, PUF, 1989. — Weinberg G.M., *An Introduction to General Systems Thinking*, New York, J. Wiley and Sons, 1975. — Weiss P.A., Texte anglais, trad. fr., *L'Archipel scientifique*, Paris, Ed. Maloine, 19 . — Westbroek P., *Life as a Geological Force. Dynamics of the Earth*, New York, W.W. Norton Cy, 1991, Norton Paperback 1992. — Wiener N., Rosenblueth A., Bigelow J., Behavior, Purpose and Teleology, dans *Philosophy of Science*, 1943, vol. n° 10, trad. fr., dans *Etudes Philosophiques*, 16e année, CNRS-PUF, 1959 ; *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Paris, Librairie Hermann et Cie, 1948, éd. suiv. complétées, the MIT Press, Cambridge Mass.. — Wilden A., *Systems and Structure*, London, Tavistock Pub. Ltd, 1972. — Yovits M. et Cameron S. (Ed.), *Self Organizing Systems*, New York, Pergamon Press, 1960. — Zadeh L.A., Polak E., *System Theory*, New York, Mc Graw Hill Book Cy, 1969. — Zeleny M. (Ed.), *Autopoïesis, a Theory of Living Organization*, New York, North Holland Pub. Cy, 1981.

**CORRÉLATS** Action, Autonomie, Auto-Poïèse, Barel Y., Bogdanov A., Cognition, Communication, Complexité, Condillac E. de, Cybernétique, Dialectique, Évolution, Fonction, Information, Intelligence, Logique naturelle, Mécanique, Modélisation, Morin E., Morphogenèse, Organisation, Paradoxe, Piaget, Régulation, Rhétorique, Réseau, Systématique, Téléologie, Transformation, Von Bertalanffy L..