

Nature et enjeux de la modélisation en sciences sociales¹

Jean Petitot (EHESS)

La nature de la modélisation en sciences sociales

Si l'on veut poser correctement la question de la légitimité, de l'opérativité, et aussi des limites, de la modélisation mathématique en sciences humaines, il est évidemment d'abord nécessaire de s'entendre sur ce que l'on entend par "modélisation".

On peut distinguer deux grands types d'applications classiques des méthodes mathématiques en sciences sociales. Le premier concerne l'utilisation de méthodes statistiques de traitement de données: analyse de corrélations, analyse factorielle, séries temporelles, etc. Le second, également fondamental, concerne l'analyse logique des contenus théoriques. Toute discipline se doit en effet de clarifier la signification opératoire de ses concepts. Elle a besoin pour cela d'une formalisation, et même, quand cela est possible, d'une axiomatisation. L'axiomatisation de la physique était d'ailleurs l'un des problèmes de Hilbert. Le structuralisme formel en fournit un autre exemple remarquable: il s'est édifié, à partir de la méréologie (la théorie des relations entre tous et parties développée d'abord dans la troisième Recherche Logique de Husserl, puis dans les travaux de l'école polonaise de logique) et des formalisations hjelmsléviennes: il visait une axiomatisation des relations de dépendance et des transformations reliant les constituants dans une structure.

Pourtant, dans ces deux cas typiques extrêmes de formalisation, même s'il y a clairement mathématisation, il n'y a pas à proprement parler modélisation. Les méthodes mathématiques utilisées y sont en effet *générales*, de portée universelle, et par conséquent *indépendantes* des sources des données et des champs d'objets auxquels elles se trouvent appliquées. C'est même cela toute leur force. Or, il n'y a modélisation au sens fort que lorsque les méthodes sont *spécifiques* de la conceptualisation théorique d'un *domaine* particulier d'objets (ce que Husserl appelait une ontologie régionale). La modélisation mathématique a en effet pour but la *reconstruction* des phénomènes propres à un champ à partir de ses concepts constitutifs: sa fonction est de transformer les concepts théoriques en algorithmes de reconstruction des phénomènes que ceux-ci subsument.

¹ Ce texte reprend celui d'une entrevue . Son style reste donc en grande partie oral.

Pour le voir, revenons un bref instant à l'exemple physique princeps de modélisation fourni par la loi de la gravitation universelle. Elle traduit mathématiquement le phénomène physique de base qu'est l'attraction gravitationnelle qu'exerce toute masse sur toute autre. Elle exprime des principes physiques généraux, mais sous la forme d'une structure mathématique très particulière, à savoir une équation différentielle. Les *solutions* de cette équation (obtenues par intégration) permettent de reconstruire avec une précision quantitative sidérante les trajectoires d'un nombre incalculable de systèmes gravitationnels.² En général, les non scientifiques n'ont guère conscience du fait que l'étonnante puissance de la reconstruction mathématique en physique repose essentiellement sur la possibilité de reproduire de façon extrêmement fidèle toute la diversité des phénomènes physiques considérés à partir de la seule interprétation mathématique de principes et de concepts généraux (par exemple, des symétries, des principes de moindre action et des lois de conservation) au moyen d'équations fondamentales.

L'herméneutique mathématique des catégories et principes constitutifs des ontologies régionales (des champs d'objets) est donc la clef de toute modélisation. On pourrait dire que la modélisation a pour fonction *d'inverser* les procédures *d'abstraction* et de *subsumption* conceptuelles qui conduisent de la diversité des phénomènes à des concepts, à des catégories et à des principes unificateurs. En physique, la traduction de ces derniers en équations différentielles permet de *réengendrer* la diversité des phénomènes comme ensemble de solutions. Il s'agit là du paradigme de toute modélisation, même lorsque celle-ci ne repose plus, comme en physique, sur des équations différentielles.³

La problématique des formes et des structures

² Pour les non spécialistes qui voudraient se faire une idée intuitive de l'extrême variété et complexité des phénomènes gravitationnels, nous nous permettons de conseiller le magnifique shareware *Gravitation* de Jeff Rommereide.

³ Comme exemple non physique d'une telle situation, cf. mon analyse de la "formule canonique du mythe" proposée par Claude Lévi-Strauss (Petitot, 1988). Il s'agit de considérer la formule canonique comme l'expression de principe structuralistes généraux, de l'interpréter mathématiquement dans le cadre de la théorie des singularités en termes de catastrophes (non élémentaires) pour, à partir de là, en dériver un vaste ensemble de modèles pour les structures narratives mythiques. Ainsi rendue *générative*, la formule canonique apparaît comme une formule "intelligente", au même titre que ce qu'on appelle les "équations intelligentes" en physique.

Ce que l'on a magistralement réussi depuis longtemps en physique et en chimie et, plus récemment, en biologie, on commence à le réussir également en sciences humaines. Celles-ci sont en train de devenir un nouveau front pour les sciences dures.

Prenons l'exemple de l'explication *des formes et des structures*. Le structuralisme a appliqué le concept de structure à un grand nombre de domaines, allant des sciences humaines à la biologie. Il se trouve que, parallèlement, se sont développés en mathématique des formalismes géométrico-dynamiques et physicalistes capables de modéliser l'apparition et le changement de structures ou de formes. Tel est en particulier le cas de la théorie des singularités et des bifurcations de systèmes dynamiques promue par René Thom. Ces théories sont apparues comme particulièrement adaptées à la modélisation des phénomènes structuralistes. Nous en verrons plus bas un exemple simple avec le phénomène dit de "perception catégorielle". Tel est aussi le cas de la théorie des fractales qui permet d'analyser des structures multi-échelles (par exemple des textures urbaines, cf. les travaux d'H. Le Bras).

De façon générale, si la théorie des singularités et des bifurcations permet de comprendre et de modéliser dynamiquement l'apparition de formes et de structures, c'est parce que toute forme structure son espace substrat à travers un système de discontinuités qualitatives. Ces discontinuités "brisent" l'homogénéité de l'espace substrat et les brisures de symétrie engendrent les formes.⁴

La théorie des singularités et des bifurcations possède de très nombreuses applications en physique. Elle a permis d'édifier sur des bases physicalistes les premiers modèles dynamiques morphologiques, dits "morphodynamiques". Il a été ainsi possible de comprendre comment des formes pouvaient "émerger" et "s'auto-organiser" stablement à l'échelle macroscopique comme conséquence causale d'interactions complexes à l'échelle microscopique. Ce sont des phénomènes microphysiques collectifs coopératifs et compétitifs qui déterminent l'origine causale des comportements macroscopiques d'ensemble brisant l'homogénéité des substrats. L'exemple physique standard est celui des *phénomènes critiques* (comme les transitions de phases). Ils présentent des propriétés d'auto-similarité caractéristiques des structures fractales.⁵

De façon plus générale c'est la *complexité* des systèmes naturels, tant physiques et biologiques que cognitifs et sociaux que l'on commence à savoir modéliser de façon convenable. Tous les systèmes complexes possèdent des propriétés macroscopiques globales émergentes provenant d'interactions collectives coopératives-compétitives. Ils sont *singuliers*, en grande partie contingents (non concrètement déterministes, i.e. présentant une sensibilité à des variations infinitésimales de leurs paramètres de

⁴ Cf. Thom, 1972, 1980, 1988, Zeeman, 1977 et Petitot, 1989d, 1991a, 1992.

⁵ Cf. Petitot, 1992 pour un panorama de ces travaux. Cf. aussi EMC, 1992.

contrôle, sensibilité produisant des effets de divergence). Ils sont historiques et résultent de processus d'évolution et d'adaptation. Ce sont des systèmes hors équilibre possédant une régulation interne leur permettant de demeurer à l'intérieur de leur domaine de viabilité. Ils n'ont plus rien à voir avec le déterminisme mécaniste laplacien qui sert de repoussoir aux critiques anti-positivistes.⁶ Leur analyse repose à la fois sur les nouvelles théories physico-mathématique que je viens d'évoquer que sur l'approche computationnelle et l'usage massif de la simulation sur ordinateur.

Il faut bien voir que cette révolution scientifique — qui, insistons-y, est à la fois théorique, mathématique et *technologique* (et n'a évidemment pas grand chose à voir avec la bouillie médiatique qui cherche à s'en emparer) — apporte pour la première fois *une méthode expérimentale* aux disciplines ne pouvant pas reconstruire concrètement leurs objets en laboratoire. Cela concerne au premier chef non seulement des sciences physiques comme l'astrophysique et la géophysique, mais aussi les sciences biologiques et les sciences humaines. La seule façon pour ces sciences d'accéder à une méthode expérimentale authentique est de construire des objets de laboratoire virtuels, une ingénierie de l'artificiel permettant de tester les modèles. C'est ce que permet l'approche computationnelle. Comme l'affirment les fondateurs du Santa Fe Institute (cf. note) “this approach represents a shift from the deductive reasoning of analysis to the inductive reasoning of synthesis”. Elle permet d'accéder à la modélisation de systèmes possédant le type de complexité des systèmes historiques et sociaux naturels.

Le rôle des systèmes dynamiques non linéaires (de leurs attracteurs, de leurs propriétés de stabilité structurelle et de leurs bifurcations), des théories du chaos, des fractales, de la physique statistique (groupe de renormalisation), de l'entropie, de la criticité auto-organisée, de la complexité algorithmique, des algorithmes génétiques, des

⁶ L'étude des systèmes complexes est devenue une new frontier des sciences dures. La convergence des intérêts scientifiques, économiques et industriels y est considérable, sans équivalent depuis la biologie moléculaire et l'informatique. Un exemple parmi beaucoup d'autres en est donné par la fondation en 1984 du Santa Fe Institute spécialisé dans cette étude. Fondé sur la synthèse scientifique et l'approche multidisciplinaire, doté d'un budget de presque 4 millions de \$, coopérant étroitement avec (entre autres) les Universités de Princeton, Stanford, Yale, Rutgers, Boston et avec les Laboratoires de Los Alamos, Caltech, AT&T Bell, il est l'une des institutions suscitant actuellement le plus d'intérêt. Animé par 4 prix Nobel (P. Anderson, K. Arrow, M. Eigen, M. Gell-Mann), 4 Mac Arthur Fellows (D. Rumelhart, J. Holland, S. Kauffman, N. Kopell) ainsi que par des scientifiques (physiciens, informaticiens, biologistes, économistes) de premier plan comme B. Arthur, P. Bak, J. Crutchfield, B. Goodwin, B. Julesz ou W. Zurek, il est l'un des lieux où s'est le mieux cristallisé la révolution de la modélisation des systèmes complexes.

automates cellulaires est ainsi devenu central dans la compréhension des systèmes complexes adaptatifs multi-agents réels et de leurs propriétés statistiques et computationnelles. Grâce à l'ingénierie des systèmes artificiels acentrés, distribués, non-hiérarchiques et auto-organisés, on commence à pouvoir modéliser et simuler correctement des systèmes biologiques (systèmes immunologiques, réseaux de neurones, processus d'évolution), écologiques, sociétaux, économiques (par exemple en tenant compte, au-delà des hypothèses sur la rationalité parfaite des agents, de décisions dans des contextes compliqués et mal définis où l'adaptation, le réapprentissage, l'induction à partir d'hypothèses en compétition jouent un rôle essentiel).

De tels outils ont permis de commencer à comprendre un certain nombre de phénomènes caractéristiques. Par exemple pourquoi, de façon très générale, l'évolution fait croître la complexité. Il semble que des facteurs fondamentaux soient la croissance auto-renforçante de la diversité dans les systèmes ouverts co-évolutifs et le “structural deepening” (on peut simuler la façon dont la compétition pousse les systèmes à opérer aux limites de leur capacité et à tirer alors avantage de la division du travail par création de sous-systèmes spécialisés).

Bref historique de la problématique de la forme en science

L'élaboration d'une problématique physico-mathématique morphodynamique pour les systèmes complexes auto-organisés a constitué une véritable “révolution scientifique”. Bien que centrale, cette problématique était en effet restée, après la rupture avec l'aristotélisme effectuée par les sciences dites "galiléennes", un véritable point aveugle des sciences modernes. Ces dernières se sont très longtemps focalisées sur le développement d'une mécanique des forces, délaissant le projet d'une dynamique des formes.

Pendant tout le XIX^{ème} siècle et la plus grande partie du XX^{ème} siècle, on a pu voir les communautés scientifiques osciller entre un rejet positiviste pur et simple de la problématique des formes et de l'organisation (qui sera alors reprise spéculativement et métaphysiquement comme dans la Naturphilosophie allemande ou le vitalisme biologique) et son acceptation, cette fois non plus dans le cadre des sciences de la nature mais dans celui des sciences de l'esprit (phénoménologie, structuralisme, etc.). En ce sens, la possibilité de passer d'une “logique” des formes à une “physique” des formes a constitué un “tournant”, *le tournant morphodynamique*.

Précisons. Déjà Aristote avait une conscience claire des deux grands types de processus dynamiques : le mouvement physique d'une part (par exemple les trajectoires des planètes ou des corps pesants), et l'embryogenèse biologique d'autre part (le

développement d'un organisme). Durant des siècles on a réfléchi sur les relations entre ces deux types de transformations temporelles.

La rupture galiléenne a privilégié la théorie mécanique du mouvement et en a permis la mathématisation. La mécanique rationnelle a ensuite dominé la physique classique. Elle a permis d'expliquer un nombre tel de phénomènes subtils qu'elle s'est imposée comme idéal de référence. Quels qu'aient été ses éblouissants développements ultérieurs, la physique fondamentale est donc demeurée une théorie centrée sur l'explication des liens entre forces et géométrie. Pendant longtemps, elle n'a rien su dire sur l'autre type de mouvement, le développement morphogénétique qui unifie non seulement géométrie et forces mais géométrie, forces et formes.

A l'époque de la fondation de la mécanique, toute l'œuvre de Leibniz était pourtant encore traversée par ce dilemme : d'un côté la mécanique des forces et de l'autre la dynamique des formes. Comme l'a expliqué André Robinet dans son ouvrage de référence sur "l'Architectonique disjonctive",⁷ Leibniz a continuellement oscillé entre deux attitudes. Selon la première, l'unique objectivité physique est l'objectivité mécaniste et ce qui relève des formes se réduit à une projection perceptive. Il ne saurait donc y avoir une ontologie des formes. Selon la seconde attitude, au contraire, il existe une ontologie des formes comme "composés" substantiels et pour en rendre compte il faut en revenir à un *hylémorphisme*, à une théorie néo-aristotélicienne des entéléchies et des formes substantielles.

C'est Emmanuel Kant qui, ayant refondé les traditions métaphysiques à partir du rationalisme scientifique, a le premier compris le statut scientifique singulier de ce qui relève de l'organisation des formes. Pour l'élucider, il a dû concevoir une troisième Critique : la *Critique de la Faculté de Juger* dont la seconde partie, la Critique de la faculté de juger téléologique, est consacrée à l'organisation biologique. Il y développe l'idée subtile (que l'on retrouve d'ailleurs dans certaines théories cognitives contemporaines comme celle de Dennett à propos du concept, tout aussi problématique, d'intentionnalité des représentations mentales) que l'organisation ("la finalité interne objective" des organismes) n'est pas en tant que telle un phénomène pleinement objectif, mais qu'elle est pourtant nécessaire, sinon à l'explication, du moins à la *compréhension* objective des phénomènes biologiques. Tout se passe *comme si* ("als ob") ce concept qui n'est a priori qu'un concept heuristique procédant de l'Idée rationnelle de totalité possédait néanmoins le statut d'une catégorie objective.⁸

Le XIX^{ème} siècle a également vu le développement remarquable de la mécanique des milieux continus: l'hydrodynamique, l'électrostatique, le magnétisme et l'électromagnétisme se sont développés sur cette base. C'est aussi le siècle de la

⁷ Robinet, 1986.

⁸ Pour des précisions, cf. Petitot, 1991a, 1992.

thermodynamique. Mais malgré ces progrès spectaculaires, la question de la forme a résisté. On peut même dire qu'elle s'est encore opacifiée. Il existe des remarques étonnantes de Maxwell à ce sujet : ce grand savant était extrêmement sensible au fait que le second principe de la thermodynamique rend apparemment impossible l'existence même des formes. Le principe de maximisation de l'entropie, selon lequel tout système fermé tend spontanément vers un état d'équilibre thermodynamique de symétrie et d'homogénéité maximales entre en contradiction avec la définition des formes comme hétérogénéités et brisures de symétries. Que faut-il donc pour expliquer les formes ? Un certain nombre de penseurs, et non des moindres, en reviendront, comme Leibniz, aux entéléchies et aux formes substantielles aristotéliennes. Il existe par exemple des pages admirables du philosophe-sémioticien Peirce sur ce point. Peirce avait lu Maxwell et les autres physiciens. Il se posait non seulement la question de l'existence des formes naturelles organisées mais aussi, en ce qui concerne l'organisation biologique, celle de leur complexification croissante au cours de l'évolution.

A la suite de la Naturphilosophie (en particulier de l'idéalisme spéculatif de Goethe et de Schelling), les vitalistes ont également introduit l'idée que des principes organisateurs morphogènes pouvaient, bien que de nature non physique, s'incarner dans des substrats matériels. L'échec de leur idéalisme fut complet. Le problème des formes et de leur développement est ainsi resté comme une épine métaphysique dans le corps de la science. Sa seule reconversion positive aura été, via la phénoménologie, celle du structuralisme (génétique comme chez Guillaume et Piaget, dynamique comme chez Tesnière, Jakobson ou Brøndal, formel comme chez Helmslev ou Lévi-Strauss).

Dans les années 1960, la révolution que j'évoquais plus haut a permis d'expliquer sur des bases *physicalistes* — donc matérialistes mais non pas pour autant réductionnistes — la possibilité d'émergence de formes. Par exemple, avec ses "structures dissipatives", le prix Nobel Ilya Prigogine a montré comment des systèmes thermodynamiques ouverts peuvent quitter leur branche d'équilibre thermodynamique, devenue instable, et bifurquer spontanément vers des états morphologiquement (spatialement et/ou temporellement) structurés. On a alors assisté à une prolifération de modèles permettant de rendre compte, dans certaines limites, de la genèse, de la stabilité et de la complexité des formes. Mathématiquement parlant, ces modèles étaient des modèles dynamiques. Quelle était donc la particularité qui leur permettait d'être opératoires, là où la mécanique et la physique classique avaient échoué ? En dégager l'idée clef a été le grand mérite de René Thom.⁹

Dans les modèles mécaniques classiques, la dynamique du système s'exprime par des trajectoires dans un espace de configuration ou, mieux, dans un espace de phase

⁹ Thom, 1972.

M dont les points représentent les états instantanés du système (par exemple un système planétaire à N corps sera repéré par un point dans un espace de dimension $6N$: 3 coordonnées de position et 3 composantes de vitesse pour chaque corps). Ces trajectoires sont solutions d'un système d'équations différentielles (ce que l'on appelle un système dynamique) défini sur M . Le lien avec l'évolution du système dans l'espace ambiant \mathbf{R}^3 se fait en réinterprétant dans \mathbf{R}^3 la trajectoire du système dans M .

Il en va tout autrement dans les modèles morphodynamiques où il s'agit de comprendre comment des formes peuvent se déployer sur des espaces substrats. On regarde en chaque point w du substrat W considéré quelle est la physique locale sous-jacente. On suppose qu'elle est décrite classiquement par un système dynamique X_w sur un espace de configuration M . Ces dynamiques *locales* X_w dépendant du point w ont été appelées par Thom *dynamiques internes*. C'est donc en chaque point du substrat qu'est définie une dynamique interne locale. L'espace ambiant \mathbf{R}^3 n'est plus le lieu du mouvement observé mais *un espace de contrôle* de dynamiques internes qui sont *inobservables en tant que telles* et qui ne se manifestent que par des qualités sensibles macroscopiques (phénoménologiques).

On voit que le statut et le rôle de l'espace-temps subissent une mutation : il ne s'agit plus exclusivement de l'espace-temps où se produisent les mouvements (les mouvements internes au substrat sont microscopiques et inobservables) mais d'un espace de contrôle de dynamiques locales interagissantes. Thom a été le premier à comprendre que l'homogénéité phénoménologique du substrat peut être brisée, et que donc des formes peuvent apparaître et évoluer, lorsque les valeurs des paramètres de contrôle franchissent des *valeurs critiques*. Il se produit en effet dans ce cas un événement de bifurcation des dynamiques internes. Le substrat change de structure locale, accident qui se traduit phénoménologiquement par des hétérogénéités spatiales et temporelles, donc par des formes.

C'est la "dialectique" subtile entre dynamique interne et espace externe qui rend possible la modélisation mathématique des formes. Changement radical du statut de l'espace-temps, caractère spontanément morphogène des déploiements spatio-temporels d'instabilités de dynamiques locales interagissantes: voilà le saut qu'il fallait franchir pour accéder à une explication physicaliste des formes.

Les modèles morphodynamiques en sciences humaines

Une théorie physicaliste des formes a pour vocation de s'appliquer également aux disciplines de sciences humaines qui analysent des structures. Tel est en particulier le cas de la perception, de la cognition et du langage. Ces domaines se sont révélés être un terrain privilégié, et fort riche, d'application pour la théorie mathématique des

systèmes dynamiques, de leurs singularités et de leurs bifurcations. On pourrait citer ici de très nombreux travaux. Par exemple ceux concernant l'utilisation des dynamiques des réseaux de neurones formels pour modéliser des phénomènes cognitifs aussi fondamentaux que la catégorisation, l'apprentissage ou l'inférence. Si l'on considère la dynamique interne X_w d'un réseau de neurones d'espace de configuration M (chaque point de M représente un état instantané global du réseau, c'est-à-dire l'état d'activation de ses neurones) et d'espace de contrôle W (l'espace des "poids" des connexions synaptiques reliant entre eux les neurones), les attracteurs de X_w décomposent M en bassins d'attraction. On assimile les attracteurs à des prototypes et les bassins d'attraction aux catégories associées. L'apprentissage consiste alors à résoudre le *problème inverse*: étant donnés des prototypes, trouver les valeurs des contrôles $w \in W$ tels que la dynamique interne associée, X_w , possède ces prototypes comme attracteurs.¹⁰

On pourrait citer également les travaux remarquables sur la perception visuelle (tant naturelle que computationnelle) permettant d'expliquer l'une des énigmes de la vision à savoir le fait que, dès les bas niveaux de traitement, une analyse du signal peut équivaloir à un formatage géométrique. Un tel formatage est possible parce que le système visuel accomplit en même temps deux tâches apparemment contradictoires: d'une part celle de régulariser le signal, et cela de façon multi-échelle, d'autre part celle de le segmenter. Pour modéliser les processus de segmentation (qui sont à la base de toute constituance) dans l'analyse morphologique d'images, on doit faire appel à des outils sophistiqués de géométrie différentielle multi-échelle et en particulier à nombre d'équations aux dérivées partielles non linéaires anisotropes. En effet il faut d'abord régulariser au maximum les parties suffisamment homogènes des images. Une technique de régularisation de base consiste à utiliser une équation de diffusion dans un "espace-échelle" (cf. aussi les algorithmes désormais bien connus de type "ondelettes"). Mais il faut également que l'analyse soit morphologique et fasse apparaître en particulier des bords bien définis. Il faut par conséquent "immuniser" ceux-ci contre la diffusion. D'où l'utilisation d'équations de diffusion anisotropes, dégénérées dans les directions normales aux bords. Les travaux particulièrement intéressants de J-M. Morel et de P-L. Lions (la récente médaille Fields) sont en grande partie consacrés à ces méthodes.¹¹

Avec de tels outils on peut également résoudre tout un ensemble de problèmes difficiles et délicats hérités de la Gestaltthéorie et de la phénoménologie de la perception comme par exemple ceux du grouping, des anticipations perceptives ou de l'intentionnalité perceptive.

¹⁰ Cf. Amit, 1989.

¹¹ Cf. Alvarez, Lions, Morel, 1992.

On pourrait citer encore les travaux de grammaire cognitive utilisant la théorie des bifurcations pour élaborer une théorie syntaxique des relations actantielles.¹²

Je me bornerai à évoquer ici très brièvement le seul exemple de la perception phonétique. Dans la perception visuelle, il est évident que les discontinuités qualitatives (les contours limitant les formes) jouent un rôle central. Mais cela est également le cas dans le domaine phonétique. La façon dont les sons du langage sont reconnus et catégorisés en phonèmes distincts par notre appareil perceptif (dans le cadre du système phonologique propre à une langue naturelle particulière) repose essentiellement sur l'existence de formes sonores. Les sons du langage se réduisent, du point de vue physique (acoustique), à un flux temporel de spectres (harmoniques et anharmoniques). Ce flux continu est pourtant perceptivement appréhendé comme une succession de phonèmes distincts et discrets. La discrétisation spontanée segmentant le flux lui permet d'encoder le code phonologique. Elle repose sur un processus de catégorisation qui repose lui-même sur un processus morphologique.

La problématique morphologique apparaît donc ici tout naturellement. Elle fait passer d'une structure acoustique appartenant au niveau physique à un autre type de structure, une structure catégorielle appartenant au niveau linguistique.

L'exemple de la perception catégorielle en phonétique

Approfondissons un instant cet exemple. Bien que très particulier, il est néanmoins très instructif. L'une des questions théoriques fondamentales qui se posent en phonétique est de relier entre eux de façon cohérente et unifiée plusieurs niveaux phénoménaux *hétérogènes*. Il existe au minimum quatre niveaux distincts : celui du contrôle articulaire des sons, celui du traitement périphérique (cochléaire) du signal audio-acoustique, celui proprement perceptif (niveau de traitement supérieur effectué dans des aires corticales spécialisées), enfin celui phonologique qui est, lui, d'ordre linguistique. Les concepts et les principes régissant ces quatre niveaux sont de natures très différentes. Etant donné qu'une modélisation mathématique correcte doit être spécifique du niveau considéré, on voit que les modèles des quatre niveaux sont eux-mêmes hétérogènes et que la difficulté est de les unifier.

Au niveau audio-acoustique, c'est le traitement du son comme signal qui importe. En traitement du signal classique on décompose un son en sons élémentaires (ses harmoniques). C'est l'analyse spectrale (transformée de Fourier). Mais au niveau perceptif, les propriétés pertinentes sont de nature assez différente de celle des spectres harmoniques. Le phénomène dominant est l'évolution temporelle de l'enveloppe continue qui module le spectre harmonique. A chaque instant, ce spectre continu

¹² Cf. Petitot, 1989a, 1991b, 1995.

possède des “pics” d’amplitude où se concentre l’énergie, ce que l’on appelle les *formants* (il faut aussi tenir compte des turbulences caractéristiques des consonnes fricatives et affriquées). Ces formants dépendent de façon complexe de la forme des résonateurs du tractus vocal, et par conséquent de son contrôle articulaire.

Au niveau linguistique, ce qui est pertinent est au contraire la catégorisation structuraliste des sons en phonèmes, unités constitutives des systèmes phonologiques des langues. Les phonèmes sont définis de façon interdépendante par des systèmes d’écarts différentiels (voisé/non voisé, compact/diffus, etc.).

Quels liens peuvent donc bien exister entre une analyse spectrale, une déformation temporelle de spectres continus dépendant de contrôles articulaires et un système catégorisant d’écarts différentiels ? Comment passer d’un niveau à l’autre dans un modèle unifié ? Sur le plan expérimental, le problème est extrêmement difficile mais l’on dispose de nombreux résultats. Je me suis en particulier intéressé à certains de ceux-ci concernant un phénomène spécifique, intéressant bien que controversé, celui dit de *perception catégorielle*. Il signifie idéalement que, contrairement à ce qui se passe pour une perception “continue” (comme celle des couleurs l’est en partie), la *discrimination* de deux sons voisins n’est effective que si ces deux sons sont *reconnus* comme différents. La discrimination est donc subordonnée à l’identification. Elle dégénère à l’intérieur des classes d’équivalence de sons que sont les catégories phonémiques. Elle n’existe qu’à la traversée d’une frontière catégorielle. Evidemment, la perception phonétique n’est pas idéalement catégorielle. Mais elle l’est partiellement (surtout pour les occlusives). Même si les données expérimentales sont complexes et difficilement interprétables, la question théorique se pose donc de savoir comment modéliser mathématiquement, après l’avoir simplifié et idéalisé, ce phénomène basique de perception catégorielle ? L’idée directrice consiste à traiter *qualitativement* les niveaux physiques sous-jacents (ici les niveaux articulaire et audio-acoustique) en n’en retenant que des traits morphologiques assez grossiers, puis de passer ces traits aux niveaux supérieurs et de montrer comment ils peuvent servir de support à un processus de catégorisation. On extrait donc des premiers niveaux les propriétés qualitatives des spectres continus (en particulier les relations entre formants). Au niveau perceptif, ces formes sensorielles sont traitées elles-mêmes de façon qualitative, ce qui permet de n’en retenir que les traits principaux, traits catégorisés en *types*. Ces types sont les phonèmes.

Le problème théorique principal est par conséquent de comprendre comment des spectres continus articulatoirement contrôlés peuvent être spontanément catégorisés. C’est ici qu’intervient la théorie des singularités. Elle permet de modéliser le passage inter-niveaux car elle possède les deux caractéristiques *a priori* nécessaires pour cela. La première est d’être qualitative: elle ne retient des phénomènes que les traits

pertinents pour le niveau supérieur. La seconde est d'être capable de modéliser les situations où une variation continue des contrôles d'un système induit des discontinuités qualitatives permettant de les catégoriser, et donc de les discrétiser. Cette situation correspond précisément à ce que l'on appelle *une bifurcation*. La catégorisation des sons en phonèmes repose sur des événements perceptifs de bifurcation qui sont l'analogue perceptif des phénomènes critiques rencontrés en physique. Les bifurcations proviennent du fait que la morphologie des spectres continus varie de façon hautement *non linéaire* en fonction des paramètres articulatoires: certaines valeurs critiques provoquent un changement brutal — “catastrophique” — du spectre continu (de la forme sonore). En faisant varier les paramètres de façon continue au voisinage d'une valeur critique, on change de façon discontinue de forme. On passe d'un type qualitatif à un autre. D'où la catégorisation.¹³

L'évaluation expérimentale du caractère opératoire de tels modèles est assez délicate car les phénomènes réels sont plus complexes, font intervenir d'autres mécanismes et, qui plus est, les données expérimentales sont imprécises et parfois même contradictoires. Certains phonéticiens pensent même que la nature catégorielle de la perception phonétique est en partie un artefact expérimental. Mais de nombreux résultats, tels ceux de Chistovich à l'ex-Léningrad, de l'ICP de Grenoble (J-L. Schwartz, C. Abry, L-J. Boë) ou du Center for Complex Systems de l'Université de Floride (H. Haken, S. Kelso et B. Tuller) semblent confirmer ce type de modèles. Quoiqu'il en soit de ce débat technique, disposer de modèles mathématiques non triviaux qui soient très contraints et très spécifiques sans être pour autant *ad hoc* est toujours un acquis scientifique déterminant.

Modèles dynamiques VS modèles symboliques

En sciences cognitives, les modèles morphodynamiques basés sur la théorie dynamique des singularités et des bifurcations s'opposent aux modèles classiques, dits “symboliques”, basés sur des outils différents, relevant plus de l'algèbre et de la logique formelle. Cette opposition est en fait générale. Elle oppose les paradigmes respectifs du cognitivisme “connexionniste” (dynamique) et du cognitivisme “classique” (symbolique).

Le cognitivisme classique s'inspire de l'analogie informatique. Il pose que la neurologie et la psychologie ont des objets respectifs (processus neuronaux vs processus mentaux) qui forment un couple analogue à celui hardware/software en informatique. Le cerveau traiterait les informations de façon analogue à un ordinateur,

¹³ Pour des précisions, cf. Petitot, 1989c.

au moyen de programmes physiquement implémentés (les représentations mentales). L'esprit, le "mind" serait donc une instance logicielle.

Cette analogie est à prendre très au sérieux. L'esprit est une machine biologique de traitement de l'information qui est issue de la phylogenèse et, malgré toutes les différences, il existe une convergence de plus en plus remarquable entre ce que nous en apprennent d'un côté les neurosciences et d'un autre côté les technologies computationnelles.

Dans le cas de la linguistique, la conception symbolique semble s'imposer avec évidence: l'analyse formelle logico-algébrique (disons chomskyenne) des langues naturelles a en effet débouché sur de nombreux résultats fort convaincants. Pourtant, l'évidence est moins claire qu'elle ne paraît. Les courants devenus actuellement dominants sont ceux des *grammaires cognitives* (R. Langacker, L. Talmy, R. Jackendoff, G. Lakoff, M. Johnson, T. Regier, C. Harris, C. Vandeloise, etc.) qui pensent que la syntaxe provient de catégorisations de niveau supérieur (en particulier de catégorisations *d'événements*) possédant des propriétés analogues à celles des catégorisations perceptives.¹⁴ Pour la perception (en particulier visuelle), cela semblerait être l'inverse: les modèles connexionnistes et dynamiques devraient être mieux adaptés que les modèles symboliques. Pourtant, de nombreux cognitivistes classiques pensent malgré tout que la perception est également le résultat de calculs logiques exécutés par des programmes formels.

Cela dit, il n'y a aucune raison de penser que ces deux types de paradigmes doivent être exclusifs l'un de l'autre. Ils sont tous les deux nécessaires. Il semble que les modèles connexionnistes-dynamiques soient bien adaptés aux phénomènes perceptifs de bas niveau et que les modèles logiques-symboliques le soient plutôt pour les phénomènes cognitifs de haut niveau. Unifier mathématiquement les deux classes de modèles est une tâche ardue, qui renvoie directement au difficile problème des liens entre logique et géométrie.

Modèles perceptifs et cognitifs

Avant que nous nous interroguions sur la signification de la modélisation en sciences humaines, j'aimerais aussi évoquer d'autres modèles perceptifs et cognitifs. Leur enjeu est de taille puisqu'il s'agit de naturaliser entre autres les contenus sémantiques des représentations mentales. L'"embodiment" physique de la cognition est essentiel car il contraint, et aussi facilite, la cognition humaine de haut niveau (par exemple le langage) en la mettant en relation avec des mécanismes de plus bas niveau (par exemple la perception et l'action qui dominent la cognition animale). Des modèles

¹⁴ Cf. par exemple Langacker, 1987, 1991.

particulièrement intéressants sont les modèles neuro-mimétiques (évoqués plus haut) qui implémentent des modèles dynamiques. Ils sont très différents des modèles de type IA qui assimilent le mental à une manipulation de symboles. Voici quelques exemples de phénomènes cognitifs de base que l'on peut désormais commencer à modéliser de cette façon.

1. Les phénomènes de catégorisation et de typicalité (les attracteurs du système sont pensés comme des prototypes et leurs bassins d'attraction comme des catégories). Ces modèles dynamiques de catégorisation rendent compte du principe structuraliste de détermination réciproque qui est constitutif des paradigmes.
2. Dans le même ordre d'idées, la complémentarité des axes syntagmatique et paradigmatic dans le langage. Si l'on apprend (par apprentissage supervisé) à un réseau connexionniste les régularités statistiques de la syntaxe d'un corpus de phrases et si l'on observe ensuite comment, dans son espace d'états internes, il a organisé le lexique de façon à pouvoir répondre correctement, on constate qu'il a construit des paradigmes sémantiques. Ce beau résultat est dû à J. Elman. En fait, de nombreux problèmes linguistiques (inférence grammaticale, anaphore, ambiguïté, polysémie, etc.) sont susceptibles de telles approches.
3. L'implémentation des liens (beaucoup plus compliqués que l'on peut croire) entre la sémantique des langues naturelles et les scènes perceptives. Par exemple T. Regier a récemment construit des réseaux connexionnistes capables d'apprendre le système prépositionnel de différentes langues et de les appliquer correctement à des configurations statiques ou dynamiques d'objets (des mini-scénarios).
4. Le phénomène d'apprentissage. L'apprentissage résout un problème inverse. Le problème direct est, étant donnés les contrôles du système (par exemple ses poids synaptiques), de déduire sa structure et ses performances (par exemple ses attracteurs dans une tâche de catégorisation). L'apprentissage consiste au contraire à modifier les contrôles du système de façon à ce qu'il puisse accomplir certaines tâches fixées a priori.
5. L'induction et la généralisation, c'est-à-dire la découverte de règles générales à partir d'une suite finie d'exemples. Il est assez étonnant de voir un système apprendre inductivement des règles. Le moment où la généralisation s'effectue possède le statut d'une transition de phase.
6. Les bases matérielles de la constituance des représentations mentales. Cette constituance, évidente dans le cas du langage, est facile à décrire et très difficile à expliquer. Elle pose un énorme problème pour des représentations mentales implémentées de façon distribuée sur un très grand nombre d'unités microscopiques. Une hypothèse actuellement débattue est que c'est la structure temporelle fine des interactions qui permet la constituance (par exemple par synchronisation d'oscillateurs

neuronaux, la phase commune à une assemblée d'oscillateurs fonctionnant comme un label pour le constituant qui s'y implémente).

7. La façon dont la focalisation attentionnelle et la reconnaissance de patterns fait bifurquer la dynamique initialement chaotique du système vers une dynamique simple. C'est la simplification de la dynamique qui correspondrait au processus de reconnaissance.

Bref, segmentation, catégorisation, typicalité, apprentissage, induction, généralisation, constituance, attention, reconnaissance sont d'ores et déjà devenus des phénomènes naturels — “embodied” — susceptibles de modélisations de type physico-mathématique et de simulations informatiques.

Les enjeux de la modélisation mathématique : la naturalisation des sciences humaines

Venons en maintenant à une réflexion plus critique et philosophique concernant les enjeux de la modélisation mathématique en sciences humaines? Ces derniers sont clairs : il s'agit de tendre vers une *naturalisation* et une *objectivation* de ces sciences. La physicalisation des processus biologiques est acquise, celle des concepts de forme et de structure l'est également en grande partie désormais. La tâche est à présent de naturaliser les processus mentaux, communicationnels et sociaux. Tel est le programme de recherche de nouvelles sciences naturelles comme les sciences cognitives, programme déjà très largement engagé et ayant déjà abouti, nous venons de le voir, à nombre de résultats significatifs, parfois même spectaculaires. C'est de façon très générale que, nous l'avons vu, des processus cognitifs aussi fondamentaux que la catégorisation, l'apprentissage ou l'inférence se trouvent maintenant modélisés sur des bases physicalistes.

Il s'agit là de l'un des phénomènes scientifiques fondamentaux de cette fin de siècle, à savoir l'investissement techno-scientifique massif (au sens de la “big science” et des ingénieries corrélatives) des opérations cognitives animales et humaines (perception, action, apprentissage, catégorisation, inférence, etc.) et des interactions sociales complexes. Après celle du vivant, l'exception ontologique de l'humain disparaît au profit d'une unification matérialiste et d'une intégration naturaliste (la science intègre toujours la diversification de ses reconstructions dans des théories unitaires monistes).

L'un des aspects les plus significatifs de la mutation de statut des sciences dans les années 40-50, admirablement exemplifié par des savants d'exception comme von Neumann ou Wiener, avait concerné l'émergence conjointe des théories, des techniques et des méthodes de l'informatique et des calculateurs, des réseaux de neurones, des automates cellulaires, des processus de traitement de l'information et des systèmes complexes auto-organisés et auto-régulés. Après plusieurs décennies de progrès en

interaction constante avec les neurosciences, la psychologie cognitive, la linguistique et certaines approches économiques, une maturité suffisante a été atteinte pour que l'on puisse parler de façon légitime, malgré les réserves d'usage, de "naturalisation" ou, mieux, d'"embodiment" de l'esprit et des interactions collectives. Les approches quantitatives et statistiques du social fondées par des savants comme Condorcet et Quételet disposent désormais d'outils mathématiques et de technologies numériques suffisamment puissants. Il s'agit là d'un mouvement profond et irréversible. En fait, non seulement une physique de la cognition est déjà bien développée, mais l'on peut même envisager désormais une physique de l'intentionnalité, une physique de la conscience phénoménologique, une physique du sens.

En dehors des milieux spécialisés concernés, on a encore peu conscience du fait que ces domaines des sciences humaines constituent désormais un nouveau front des techno-sciences dures. Cette convergence remarquable des neurosciences, de la psychologie cognitive expérimentale, de l'Intelligence Artificielle, de la Vie Artificielle et des modèles physico-mathématiques de systèmes complexes permet d'objectiver, de modéliser mathématiquement et de simuler informatiquement, donc d'expliquer et de maîtriser, un nombre toujours plus important de phénomènes cognitifs et sociaux que l'on croyait jusqu'ici être irréductibles à toute naturalisation.

Nombreux sont ceux qui rejettent toutefois ce programme de naturalisation de l'esprit, du social et du sens. Ils le perçoivent en effet comme une réification de l'humain (souvent, il reprennent, chacun à leur façon, des thèses assez analogues à celles de l'Ecole de Francfort, en particulier de Horkheimer, sur une supposée complicité du rationalisme instrumental techno-scientifique avec la domination politique).

Il faut reconnaître que la question est très délicate et idéologiquement très biaisée. De nombreuses traditions philosophiques continentales reposent en effet sur une disjonction de la connaissance techno-scientifique et de la pensée du sens de l'être. Comme l'affirmait Heidegger: *die Wissenschaft denkt nicht*. Ces traditions restent en grande partie dominées par une interprétation péjorative de la nature instrumentale et pragmatiste de la science. Elles lui dénie tout sens et toute valeur intrinsèques. Ce faisant, elles l'excluent de toute téléologie émancipatrice. Par contrecoup, les disciplines interprétatives se retrouvent investies de la responsabilité historique de fabriquer du sens et d'en conférer à ce qui n'en possède pas de soi-même au moyen d'une démiurgie herméneutique qui *inverse* l'ordre des valeurs. Mais, rejetant la science, donc la maîtrise, elles ne possèdent plus dès lors pour ce faire que le véhicule magique de la narrativité. Elles ne peuvent plus qu'identifier l'évolution historique à ce que Jean-François Lyotard a appelé des "grands récits" téléologiques d'émancipation et de libération. Elles aliènent les consciences dans l'hétéronomie des mythes de l'espérance.

Le siècle a montré quel est le prix inéluctable de cette manipulation de l'imaginaire (du principe de plaisir politique): la terreur.

Certes, la mise en récit est nécessaire à la vie car elle permet de subjectiviser, de métaboliser psychiquement, une expérience vécue qui resterait autrement indicible. La métapsychologie freudienne, la mythologie structurale lévi-straussienne, la sémiotique greimassienne, l'herméneutique ricœurienne, ont montré à quel point la narrativisation des vécus au moyen de rôles actantiels, de rapports à des Destinateurs transcendants, de conflits, d'épreuves, de triomphes, de défaites, de sanctions, etc. était existentiellement fonctionnelle. Mais que des mythes finalisent et motivent des actions n'implique évidemment pas que les sciences humaines doivent elles-mêmes en produire. L'ascèse scientifique — "l'héroïsme de la Raison" — a toujours reposé sur une neutralisation des mythes, sur un athéisme méthodologique envers de telles croyances.

Toute naturalisation — et celle du sens n'a aucune raison de faire exception — relève d'une attitude objectivante (ce qui ne veut pas dire réifiante). Bien sûr, il existe des dimensions humaines qu'il n'est peut-être pas souhaitable d'objectiver (bien que cela ne soit pas du tout aussi évident que cela peut en avoir l'air). Mais il faut bien voir que le problème n'est pas ici celui de l'essence de l'humain et de l'irréductibilité des expériences existentielles, mais celui du statut de scientificité de certaines pratiques discursives prenant la responsabilité de justifier certains engagements.

La critique contemporaine des sciences exactes par les sciences humaines

Nombreuses sont les sciences humaines contemporaines qui adoptent une perspective critique quant à la rationalité techno-scientifique. Leur refus des exigences méthodologiques, théoriques et expérimentales de cette dernière va de pair avec une volonté croissante de légiférer sur son statut. Partant du fait que la science constitue un phénomène social total dans les sociétés développées modernes on se propose d'étudier au moyen de méthodes de sciences humaines certains aspects de sa pratique: histoire institutionnelle, sociologie des milieux académiques, psychologie de l'invention, techniques de communication, rhétorique de la persuasion, sémiotique des publications, impacts techniques et industriels, etc. Cela est évidemment parfaitement justifié. Il est fallacieux d'essayer de disjoindre la rationalité idéale des sciences de la matérialité socio-historique de leur pratique. Les techno-sciences sont bien sûr profondément engagées, situées, dans leurs contextes institutionnels, politiques, économiques, industriels, militaires, culturels et, réciproquement, agissent de façon cruciale sur les sociétés modernes qu'elles reconfigurent et déterminent à tous les niveaux d'activité et de pouvoir.

Mais, souvent, dans ces analyses un biais idéologique se fait jour. Le syllogisme est toujours le même. Au nom de l'externalisme, on met d'abord entre parenthèses les contenus objectifs spécifiques qui légitiment les droits, et les pouvoirs, de la science. On "découvre" ensuite que la science est une activité humaine "comme une autre", possédant, comme n'importe quelle autre, une histoire et des pratiques socio-discursives. On en conclut alors que les droits, et les pouvoirs, de la science sont injustifiés et doivent par conséquent être reconsidérés. L'historien étudiera l'immersion historique de la science et ses dépendances contextuelles envers les mentalités des époques successives comme si celle-ci pouvait engendrer des réponses à des problèmes objectifs trans-historiques; le critique sémioticien en étudiera les processus rhétoriques de persuasion comme si ceux-ci pouvaient déterminer une vérité; le sociologue en analysera les négociations avec le monde politique, le processus de production capitaliste et le complexe militaro-industriel, comme si celles-ci pouvaient expliquer les orientations théoriques, etc.

Ces relativisations historicistes, sociologisantes et rhétoriques des sciences dures ne sont pas justifiées. En effet, si les sciences modernes entretiennent des rapports si étroits avec les domaines du technique, du politique, du social, de l'entreprise et du culturel, et si leurs pratiques matérielles sont non seulement objectivement contraintes mais aussi socialement déterminées, il n'en demeure pas moins que, qu'on le veuille ou non, ce pouvoir de la science comme phénomène social total est dû à son inimaginable réussite (même si nous nous sommes habitués à ce miracle permanent, nous ne devons pas pour autant le banaliser). Or les conditions de possibilité de celle-ci demeurent encore très largement incomprises (d'où d'ailleurs la justification d'une épistémologie internaliste)

Qui plus est, ces relativisations ne sont pas idéologiquement innocentes. Ce sont les armes d'un combat. En déconstruisant les concepts d'épistémé et de vérité et en délégitimant l'autorité de la science, elles visent à immuniser certaines pratiques interprétatives contre le nouveau front de recherche ouvert par la naturalisation du sens. Il s'agit en fait, pour celles des sciences humaines qui renoncent à la recherche de structures et de lois objectives et rejettent l'idéal "galiléen" comme un dévoiement, de justifier un retour à une approche "littéraire" compréhensive des vécus.

Il est évident que des études socio-historiques précises et approfondies peuvent apporter beaucoup à la compréhension du phénomène social total que constitue la science dans les sociétés modernes. Mais il est tout aussi certain qu'elles ne sauraient prétendre déconstruire le concept de vérité objective. Ce concept relève en effet des contenus expérimentaux, théoriques et mathématiques. Il est par conséquent sophistique d'analyser la science en dehors de ces contenus tout en prétendant légiférer sur la nature de sa vérité. Qui plus est, ces analyses de la science comme processus socio-historique

ne seraient justifiées que si l'on savait, au-delà d'une simple description, ce que sont un système de relations sociales, une représentation mentale, une représentation collective, une structure sémio-narrative, l'efficacité symbolique d'un récit, etc. Mais pour savoir en vérité ce que sont ces entités typiquement complexes, il faut précisément naturaliser les sciences qui ont à charge de les décrire, et cela exige des trésors de sciences dures...

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ, L., LIONS, P-L., MOREL, J-M., 1992. "Image selective smoothing and edge detection by non linear diffusion, *SIAM J. Numer. Anal.*, 29 : 845-866.
- AMIT, D., 1989. *Modeling Brain Function*, Cambridge University Press.
- BRITTAN, G., 1978. *Kant's Theory of Science*, Princeton University Press.
- CASSIRER, E., 1983. *Les Systèmes post-kantiens* (trad. Collège de Philosophie), Presses Universitaires de Lille. Vol. 3 de *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und der Wissenschaft der neueren Zeit*, Berlin, 1923.
- EMC, 1992. *Emergence dans les Modèles de la Cognition*, (A. Grumbach, E. Bonabeau eds.), Telecom, Paris.
- FINKIELKRAUT, A., 1987. *La défaite de la pensée*, Paris, Gallimard.
- GOETHE, J.W.von, 1780-1830. *La Métamorphose des Plantes* (trad. H. Bideau), Paris, Triades, 1975.
- HOLENSTEIN, E., 1992. "Phenomenological Structuralism and Cognitive Semiotics" (R. Benatti ed.), *Scripta Semiotica*, 1, 133-158, (Peter Lang).
- HUSSERL, E., 1969-1974. *Recherches Logiques*, Paris, Presses Universitaires de France.
- HUSSERL, E., 1950. *Idées Directrices pour une Phénoménologie*, (trad. P. Ricoeur), Paris, Gallimard, 1982.
- KANT, E, 1979. *Critique de la Faculté de Juger*, trad. A. Philonenko, Paris, Vrin.
- KANT, E, 1980-1986. *Oeuvres philosophiques* (F. Alquié ed.), Paris, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard.
- LANGACKER, R., 1987/1991. *Foundations of Cognitive Grammar*, Vol. I et II, Stanford University Press.
- LARGEAULT, J., 1984, *Philosophie de la Nature*, Université de Paris XII.
- LTC, 1989. *Logos et Théorie des Catastrophes* (Colloque de Cerisy à partir de l'oeuvre de René Thom, J. Petitot ed.), Genève, Editions Patino.
- NEMO, Ph., 1988. *La société de droit selon F. A. Hayek*, Paris, PUF.
- MARR, D., 1982. *Vision*. San Francisco : Freeman.
- OUELLET, P., 1987. "Une Physique du Sens", *Critique*, 481-482, 577-597.

- PETITOT, J., 1988, "Approche morphodynamique de la formule canonique du mythe", *L'Homme*, 106-107, XXVIII (2-3), 24-50.
- PETITOT, J., 1989a. "Hypothèse localiste, Modèles morphodynamiques et Théories cognitives : Remarques sur une note de 1975", *Semiotica*, 77, 1/3, 65-119.
- PETITOT, J., 1989b. "Structuralisme et Phénoménologie", *LTC [1989]*, 345-376.
- PETITOT, J., 1989c. "Morphodynamics and the Categorical Perception of Phonological Units", *Theoretical Linguistics*, 15, 1/2, 25-71.
- PETITOT, J., 1989d. "Forme", *Encyclopædia Universalis*, XI, 712-728, Paris.
- PETITOT, J., 1990. "Le Physique, le Morphologique, le Symbolique. Remarques sur la Vision", *Revue de Synthèse*, 1-2 : 139-183.
- PETITOT, J., 1991a. *La Philosophie transcendantale et le Problème de l'Objectivité*, Paris, Editions Osiris.
- PETITOT, J., 1991b. "Syntaxe topologique et Grammaire cognitive", *Langages*, 103, 97-128.
- PETITOT, J., 1992. *Physique du Sens*. Paris : Editions du CNRS.
- PETITOT, J., 1993a. "Topologie phénoménale. Sur l'actualité scientifique de la *phusis* phénoménologique de Maurice Merleau-Ponty", *Merleau-Ponty. Le philosophe et son langage*, (F. Heidsieck ed.), Cahiers Recherches sur la philosophie et le langage, 15, 291-322, Paris, Vrin.
- PETITOT, J., 1993b. "Phénoménologie naturalisée et Morphodynamique", *Philosophie et sciences cognitives*, (J.-M. Salanskis éd.), *Intellectica*, 17, 79-126.
- PETITOT, J., 1995. "Morphodynamics and Attractor Syntax", *Mind as Motion*, (T. von Gelder, B. Port eds.), MIT Press.
- PETITOT, J., SMITH, B., 1991. "New Foundations for Qualitative Physics", *Evolving Knowledge in Natural Science and Artificial Intelligence*, (J.E. Tiles, G.J. McKee, G.C. Dean eds.), 231-249, Pitman, London.
- PHILONENKO, A., 1972. *L'œuvre de Kant*, Paris, Vrin.
- PUTNAM, H., 1987. *The Many Faces of Realism*, Open Court, LaSalle, Illinois.
- ROBINET, A., 1986. *Architectonique disjonctive, Automates systémiques et Idéauté transcendantale dans l'œuvre de G. W. Leibniz*, Paris, Vrin.
- RS, 1990. Sciences cognitives : quelques aspects problématiques, (J. Petitot ed.). *Revue de Synthèse*, IV, 1-2.
- SIMON, H., et al., 1994. "Literary Criticism: A Cognitive Approach", *Stanford Humanities Review*, Suppl. vol. 4, 1.
- THOM, R., 1972. *Stabilité structurelle et Morphogenèse*, New York, Benjamin, Paris, Ediscience.
- THOM, R., 1980. *Modèles mathématiques de la Morphogenèse* (2ème ed.), Paris, Christian Bourgois.

THOM, R., 1988. *Esquisse d'une Sémiophysique*, Paris, InterEditions.

WUKETITS, F.M., 1980. "On the Notion of Teleology in Contemporary Life Sciences", *Dialectica*, 34, 4, 277-290.

ZEEMAN, Ch., 1977. *Catastrophe Theory*, Massachusetts, Addison-Wesley .