

LES MODÈLES MORPHODYNAMIQUES EN PERCEPTION VISUELLE

Jean Petitot
École des Hautes Études
en Sciences Sociales

INTRODUCTION

Nous nous entretiendrons ici de sémiotique de l'image et, en particulier, de sémiotique visuelle¹. Cette sémiotique appartient à ce que l'on appelle la sémiotique du monde naturel et nous rencontrons d'emblée à son propos une alternative épistémologique sur laquelle j'insiste depuis déjà plusieurs années. Une sémiotique peut être conçue de deux façons:

- (i) soit comme une discipline descriptive et conceptuelle s'occupant d'un niveau de réalité autonome, qui serait le niveau de réalité de la saisie et de l'articulation du sens;
- (ii) soit comme une science explicative et mathématisée d'un niveau de réalité émergent, fondé dans des niveaux de réalité sous-jacents, en particulier, pour une sémiotique du monde naturel, ceux du monde et de la nature qui font l'objet d'autres sciences que la sémiotique. Autrement dit, on peut concevoir la sémiotique soit comme une discipline structurale formelle d'un type *sui generis*, soit comme une science structurale *naturelle* appartenant à des sciences naturelles *élargies*. C'est ce second point de vue qui représente actuellement l'un

des grands fronts des sciences humaines, que j'adopterai ici et cela dans l'optique d'une naturalisation du sens.

Je crois que la période des sciences humaines autonomes et en particulier des disciplines structurales, a laissé place, progressivement, au cours des années 1980, à un rapprochement avec des sciences naturelles élargies. Il y a là un "tournant" dont les conséquences immédiates sont les suivantes:

- (i) premièrement, dans la mesure où une sémiotique du monde naturel concerne l'apparaître du monde — et donc sa manifestation phénoménologique — elle est en droit fondée dans une phénoménologie de la manifestation sensible;
- (ii) deuxièmement, une sémiotique visuelle à prétention scientifique est en droit fondée dans une phénoménologie de la perception naturalisée;
- (iii) troisièmement, une phénoménologie de la perception naturalisée concerne avant tout la structuration du monde naturel en formes, en

structures morphologiques. Il n'y aurait pas de possibilité d'investissement sémiotique du monde naturel, ce qu'on appelle l'extéroceptivité et le figuratif, s'il n'y en avait pas au préalable une constitution morphologique. Une sémiotique scientifique du visuel est donc en droit fondée dans une théorie scientifique de la forme;

- (iv) et, quatrième, une sémiotique scientifique du visuel est donc constitutivement dépendante de deux autres types de sciences. D'abord des sciences morphodynamiques qui correspondent à l'extraordinaire élargissement des sciences naturelles permettant d'élaborer une physique macroscopique qualitative. Il s'agit de théories à bases physiques de l'auto-organisation des substrats matériels. Elles sont importantes parce qu'elles permettent de comprendre les formes naturelles comme des structures morphologiques émergentes, objectives, et sans la compréhension de ce fait fondamental — à savoir que le monde naturel est capable d'auto-organisation morphologique spontanée — aucune phénoménologie de la perception naturalisée et donc aucune sémiotique du monde naturel à vocation scientifique ne sont possibles. L'autre type de sciences dont, dans cette optique, la sémiotique devient constitutivement solidaire concerne les sciences cognitives qui permettent de comprendre quels sont les actes cognitifs constitutifs de la perception des formes objectives.

Bref une phénoménologie des formes naturalisées qui se veut scientifique (et pas seulement descriptive comme chez Husserl) est le résultat de l'unification de ces deux types de sciences. Elle fonde le programme de recherche d'une sémiotique du monde naturel.

1. PHÉNOMÉNOLOGIE DES FORMES

C'est sur ce thème général d'une réflexion fondationnelle sur les possibilités d'une sémiotique scientifique du visuel que j'aimerais proposer quelques remarques. Pour qu'il n'y ait pas de quiproquos ni de malentendus, je souligne qu'adopter cette perspective ne veut évidemment pas dire que l'on n'accorde pas d'importance à d'autres aspects de la sémiotique. J'ai moi-même

beaucoup travaillé sur les niveaux supérieurs de sémioticité. Mais ici je me suis fixé comme but de parler plutôt des problèmes fondationnels préalables.

Nous venons de voir qu'il n'y a pas de sémio- tique visuelle sans phénoménologie de la percep- tion, et qu'il n'y a pas de phénoménologie de la perception sans théorie des formes. Les formes naturelles étant les constituants fondamentaux de la façon dont le monde externe nous apparaît, il importe avant tout de savoir ce qu'est une forme comme phénomène, comme pur apparaître. Pour accéder à une telle description phénoménologique, je pr ciserais d'abord certaines formulations pro- posées par Husserl et par les gestaltistes, en par- ticulier Stumpf, au début de ce siècle (Husserl 1900-1901).

Une forme sensible F donnée dans un espace ambiant externe E occupe une certaine portion W de E . Ce domaine d'occupation, que Husserl appelait le corps spatial de la forme — c'est une très jolie expression, le corps spatial — est limité par un bord $B = \partial W$ et est, en outre, rempli par des qualités sensibles, par exemple des couleurs et des textures, Q_1, Q_n , par des *qualia*, les fameuses qualités secondes de la tradition philosophique qui s'opposent à la qualité première qu'est l'ex- tension spatiale. Regardez autour de vous, vous voyez essentiellement des domaines délimités par des bords et remplis par des qualités sensibles. Mais pour qu'une forme puisse émerger, son domaine W doit être investi par des qualités sen- sibles d'une façon telle que l'extension spatiale ainsi qualifiée manifeste une certaine *saillance* phénoménologique qui permette à la forme d'être appréhendée et d'être saisie perceptivement. Sans saillances, il n'y aurait aucune perception possi- ble. Comme le disait Husserl: il faut que le phénomène puisse se détacher en tant que phénomène.

Comment un phénomène se détache-t-il comme phénomène? C'est le concept de disconti- nuit  qualitative, remarquablement exposé par Husserl dans la 3^e Recherche logique, qui est ici fondamental (Husserl 1900-1901; Petitot 1989a, 1989b, 1993b, 1994a, 1995b). L'opposition clé, essen- tielle dans l'histoire de la psychologie, est celle entre d'un côté ce que Husserl appelait (  la suite de Stumpf) les qualités sensibles qui sont locale-

ment *fusionnées*, qui engendrent une homogénéité locale, et d'un autre côté les qualités sensibles qui sont localement séparées et qui se scindent, se détachent, se séparent des qualités locales voisines et engendrent des segmentations locales. Si vous traitez les qualités sensibles comme des grandeurs intensives, l'opposition entre fusionnement et segmentation devient celle entre continuité et discontinuité: le fusionnement correspond à une variation continue du degré de la qualité considérée, tandis que la segmentation correspond au contraire à une variation discontinue. L'idée essentielle est que, l'extension spatiale W de la forme contrôlant les qualités sensibles qui la remplissent, il y a toujours variation continue dans l'extension spatiale, mais qu'à la traversée de certains lieux de discontinuité, les qualités subissent des variations brusques.

Soit K l'ensemble des discontinuités qualitatives ainsi définies, augmentées du bord $B=\partial W$ du domaine W . K est la caractéristique morphologique essentielle de la forme considérée. J'ai supposé que W était un domaine spatial et que la forme F était une forme statique. Si vous introduisez la notion de temps, vous aurez des discontinuités qualitatives spatiales qui évoluent, se déforment et se transforment au cours du temps, et vous observerez alors des processus de morphogenèse dans un sens tout à fait général.

C'est cette idée fondamentale — à savoir qu'une forme comme phénomène pur est essentiellement descriptible comme un ensemble de discontinuités qualitatives sur un espace substrat — qui, on le sait, a été formalisée il y a une vingtaine d'années par René Thom (1972, 1980, 1988; et Petitot 1992a). Soit toujours W l'espace substrat rempli de qualités sensibles Q_i . Thom a distingué deux types phénoménologiques de points dans l'extension spatiale W : d'une part, les points *réguliers* pour lesquels il existe un voisinage où les qualités sensibles sont continues, ce qui correspond exactement au fusionnement et, d'autre part, les points *singulier* où il y a au moins une des qualités sensibles qui présente une discontinuité saillante, ce qui correspond exactement à la segmentation. Les points singuliers engendrent l'ensemble K des discontinuités qualitatives. Les phénoménologues, les mathématiciens et les gestalt-théoriciens sont donc d'accord pour dire

qu'une forme se ramène à un ensemble de discontinuités qualitatives sur un certain espace substrat. Voilà la clef de la description phénoménologique d'une forme comme phénomène pur.

Bien entendu, ce concept général de forme que je viens d'esquisser peut être considérablement complexifié. Les morphologies n'ont pas forcément une bonne géométrie. Elles peuvent être fractales par exemple: il peut exister du chaos dans les formes. Elles peuvent être régulièrement structurées mais à plusieurs échelles différentes et l'on observera alors des structures différentes suivant le niveau d'observation. Mais quelles que soient les formes considérées, et aussi compliquées soient-elles, elles manifesteront toujours une structuration spatio-temporelle qualitative de leur substrat.

2. LE PROBLÈME DE LA GENÈSE DES FORMES

Toute la question est alors de comprendre d'un côté la genèse physique et de l'autre côté la genèse cognitive de ces formes-phénomènes. Les formes constituent une interface entre le sujet percevant et le monde extérieur, et l'on peut en chercher la genèse des deux côtés. Si on les pense du côté du sujet, on cherchera à en faire le résultat de constructions cognitives. Je vais y revenir. Mais on peut aussi chercher à les théoriser comme des structures qualitatives émergeant de la matérialité même des substrats. C'est ce que René Thom et d'autres grands spécialistes de l'auto-organisation comme Ilya Prigogine, ainsi que toute une pléiade d'éminents physiciens et chimistes, thermodynamiciens et biologistes ont réussi à faire depuis une trentaine d'années: montrer comment des discontinuités qualitatives pouvaient apparaître spontanément dans les substrats matériels naturels. Ces remarquables découvertes scientifiques vont dans le sens d'un réalisme de la perception et confirment la thèse que les formes ne sont pas seulement des constructions perceptives mais possèdent des corrélats *objectifs*.

J'aimerais faire ici une petite parenthèse philosophique. Ce n'est que très récemment que l'on a commencé à accéder à une compréhension naturaliste des formes, et il s'agit là certainement de l'une des plus grandes conquêtes scientifiques de cette seconde moitié du siècle. En effet, l'idée,

la voie, d'une physique des formes a été barrée par le triomphe du mécanisme aux XVII^e et XVIII^e siècles. Durant cette période on a développé une physique de la matière qui se réduisait essentiellement à une mécanique de points matériels en interaction et qui a fait perdre, pour plus de trois siècles, au concept de forme tout contenu proprement scientifique. La physique des forces a occulté toute dynamique des formes. Dans une certaine mesure c'est le fait même qu'une physique des forces rende impossible une dynamique des formes qui est le véritable sens de ce que l'on a appelé la coupure épistémologique, et a engendré la rupture avec la tradition aristotélicienne que l'on trouve encore extrêmement vivante chez un philosophe comme Leibniz (qui a souvent essayé de concilier une mécanique des forces avec une dynamique des formes). Tout cela a été admirablement expliqué par Kant dans la troisième Critique, la *Critique de la faculté de juger* qui est, on le sait, une critique supplémentaire à la *Critique de la raison pure*, concernant la physique, et la *Critique de la raison pratique*, concernant l'éthique. Dans la troisième Critique, Kant expose une théorie unifiée d'un côté des formes et de l'organisation biologique et d'un autre côté de l'esthétique, c'est-à-dire en fait de la signification au sens sémiotique. Il traite ainsi ensemble organisation et signification comme un tout indissociable (Kant 1790; aussi Petitot 1991, 1992a, 1992b).

Il y a une signification intrinsèque des formes et c'est pour cela que les formes ne peuvent être simplement physiques. Comme dit Thom: elles sont *sémio-physiques*, elles sont à la fois sémiotiques et physiques, et c'est pour cela qu'il est si difficile de les comprendre et de les expliquer scientifiquement. Comme Cassirer l'a bien montré dans l'un de ses grands ouvrages sur Kant, dans la troisième Critique Kant reprend à bras le corps l'héritage de la tradition aristotélicienne concernant les rapports entre forme et matière. Il explique que, étant données les contraintes imposées par le concept moderne d'objectivité, les concepts de forme, d'organisation et de structuration qualitative ne peuvent plus posséder de réalité objective même si, pourtant, l'existence de formes dans la nature est un fait objectif incontestable. Il continue son raisonnement en disant qu'on peut certes penser qu'un jour la physique,

la chimie et la biologie arriveront à expliquer les problèmes de forme et d'organisation, mais qu'il restera toujours une énigme: celle de la *géométrie* de ces formes et de leur *contingence*. La nature est productrice de formes qui sont des objets géométriques mais cette production n'est pas physiquement explicable, car on ne voit pas comment une mécanique au sens newtonien pourrait bien déboucher sur une géométrie morphologique. Kant explique alors, et je pense que c'est vraiment tout à fait fondamental pour nos réflexions sémiotiques, que c'est précisément parce qu'il y a un défaut d'objectivité dans les formes naturelles comme les cristaux, les flammes, les tourbillons, les fleurs, ou les organismes vivants, que ces formes sont corrélatives du supplément de subjectivité que sont la signification et le sentiment esthétique.

C'est parce que les formes naturelles ne sont pas *mécaniquement* objectives qu'elles peuvent être *intrinsèquement* significatives. L'absence de valeur objective s'y vicarie en valeur signifiante: comme dit Kant il y a une complémentarité entre la "finalité interne objective", c'est-à-dire l'organisation morphologique, et la "finalité subjective formelle", c'est-à-dire la signification. Un manque physique se trouve compensé par un supplément sémiotique. Tout le post-kantisme, en particulier le Romantisme, s'engouffrera dans ce passage de la *phusis* à la *poiesis* et ralliera à l'art la nature productrice des formes: ce que Kant lui-même appelait la nature en tant qu'art. Il existe donc une ambivalence fondamentale — physique, phénoménologique et sémiotique — du concept de forme, ambivalence qui a constitué depuis Kant un véritable nœud gordien de l'épistémologie et de la philosophie des sciences.

Il y a *grosso modo* deux grandes voies de résolution de ce problème et nous en sommes tous les héritiers d'une façon ou d'une autre. La première voie est la voie subjectiviste: on fait son deuil d'une quelconque objectivité des formes et on les réduit à des constructions cognitives. Les formes étant des représentations internes, leur sémiotisation est elle-même un phénomène interne. La conséquence en est que, en ce qui concerne le rapport entre forme et sens, on doit adopter un point de vue solipsiste. C'est pourquoi une bonne partie de la sémiotique est solipsiste comme l'est aussi une

bonne partie de la psychologie. Ou bien on essaie au contraire, d'emprunter une voie objectiviste en tentant d'élargir le concept de nature. Un cas exemplaire a été celui du Romantisme, dont je parlais à l'instant. La *Naturphilosophie* de philosophes comme Schelling ou Goethe l'exemplifie. Vous savez que Goethe fut, comme Valéry, un grand penseur de la problématique de la forme. Dans ses travaux sur la morphogenèse végétale, qu'il a poursuivis pendant cinquante ans de 1770 jusqu'à sa mort en 1832, il a cherché à développer une théorie de la forme à partir d'un concept élargi de nature. Il a repris toute une série de concepts aristotéliens concernant les rapports entre forme et matière, en particulier les concepts de forme substantielle et d'entéléchie, et il a essayé de les naturaliser. Évidemment ce type de réalisme sémiotique est très ambigu sur le plan scientifique parce qu'il est intimement lié au vitalisme biologique. Toutefois, Goethe n'est pas véritablement vitaliste. Moins spéculatif que Schelling, il s'en tient à une description phénoménologique, à une véritable sémiotique de l'apparaître morphologique. Il est le premier, je crois, à avoir pensé que les formes ne sont pas seulement des phénomènes au sens de Kant, c'est-à-dire des représentations à objectiver conformément à la légalisation transcendantale de l'objectivité, mais que ce sont également des *signes*, des présences traductibles en symboles. Il y a un jeu subtil entre *Gestaltung*, *Form* et *Bildung*. La visibilité de l'apparaître y exprime le principe d'organisation interne présidant à la formation des formes et ce principe est sémiotique. Le fondement organisateur n'est pas derrière ou avant l'apparaître; il se donne dans l'apparaître même dans la mesure où pour celui-ci la monstration équivaut à une auto-interprétation.

Après Goethe, il faudra attendre de grands penseurs comme Peirce ou Husserl pour retrouver une interprétation sémiotique de la forme. Peirce a lui aussi été fasciné par l'énigme de la structuration, de la diversification, de la complexification et de la signification intrinsèques des formes naturelles. Il a repris lui aussi, comme Goethe, comme Leibniz, les thèmes majeurs de l'héritage aristotélien en essayant de les naturaliser, de les réintroduire dans les sciences de la nature et, ce faisant, il en est également arrivé à

une conception sémiotique des entéléchies, des principes organisateurs des formes comme signes. Pour lui, les entéléchies étaient des signes s'auto-interprétant, le signe étant ici une matière déterminée par une forme, c'est-à-dire une finalité interne au sens kantien.

C'est en fait cette tradition qui, au cours de notre siècle, a été transférée des sciences naturelles vers les sciences humaines, en particulier à travers la phénoménologie. Claude Lévi-Strauss en a lui-même récemment témoigné, ce qui est éminemment intéressant pour l'histoire du structuralisme, dans son ouvrage intitulé *De près et de loin*. La notion de transformation, qui joue un rôle fondamental dans l'analyse structurale, n'a été empruntée "ni aux logiciens, ni aux linguistes. Elle me vient d'un ouvrage qui a joué pour moi un rôle décisif (...): *On Growth and Form*". Cet ouvrage célèbre de D'Arcy Thompson est d'ailleurs aussi à l'origine des travaux de Thom sur la morphogenèse biologique. "L'auteur (...) interprétait comme des transformations les différences visibles entre les espèces ou organes animaux ou végétaux au sein d'un même genre. Ce fut une illumination d'autant que j'allais vite m'apercevoir que cette façon de voir s'inscrivait dans une longue tradition: derrière Thompson, il y avait la botanique de Goethe, et derrière Goethe, Albert Dürer avec son *Traité de la proportion du corps humain*." (Lévi-Strauss 1988: 158-159).

3. NEUROPHYSIOLOGIE DES FORMES ET COGNITION VISUELLE

Je vais maintenant évoquer les difficultés fondamentales qu'il y a à passer de la forme comme phénomène pur, sémiotiquement investi, à la forme comme objet scientifique. J'ai dit qu'il fallait voir ce passage de deux façons: du côté du monde externe et du côté du sujet cognitif. En ce qui concerne le monde externe, je serai très bref car cela fait très longtemps que j'en parle. Il s'agit de tout ce qui concerne les théories de l'auto-organisation. Ces notions font désormais partie de la culture scientifique commune. La dynamique des formes que Kant estimait impossible est devenue possible sur des bases physiques grâce aux théories de l'émergence de structures qualitatives dans les substrats matériels. Comme je l'ai dit, c'est l'une

des grandes révolutions scientifiques de l'après-guerre.

Voyons à présent du côté des sciences cognitives. Qu'est-ce qu'une forme en tant qu'image pour les sciences cognitives contemporaines? Le paradigme actuellement dominant en sciences cognitives est un paradigme représentationniste, computationnel, symbolique et fonctionnaliste (RS 1990). Qu'est-ce que cela veut dire? "Représentationniste" signifie qu'il accepte l'existence de représentations mentales. "Computationnel" signifie qu'il postule que ces représentations mentales servent à calculer, comme dans un ordinateur. "Symbolique" signifie que ces calculs sont de type symbolique, comme dans les langages logiques formels. Enfin, "fonctionnaliste" signifie qu'il postule qu'une bonne théorie des représentations mentales peut être développée sur la base d'une analogie avec les ordinateurs, où, on le sait, on sépare la couche matérielle (le *hardware*) et la couche logicielle (le *software*), le même *software* (donc la même structure logique abstraite) pouvant être physiquement réalisée (implémentée) dans des *hardwares* complètement différents. On admet donc que les opérations mentales, bien qu'évidemment réalisées dans un substrat neuronal, sont en fait, au niveau de leur forme logique, indépendantes de cette réalisation physique.

À partir de ces quatre hypothèses fondamentales, qui sont d'ailleurs fort controversées dans la mesure où elles n'ont rien d'évident, on suppose que les choses fonctionnent de la façon suivante. Il existe un monde physique extérieur qui envoie des signaux, par exemple des ondes lumineuses. Les ondes lumineuses distales arrivent sur les photorécepteurs de notre rétine et y constituent une information proximale qui n'est pas en tant que telle (avant d'être traitée) significative pour le système cognitif. Cette information va être convertie au niveau sensoriel par les transducteurs périphériques, à savoir les cellules ganglionnaires de la rétine. À travers cet extraordinaire dispositif transformant les informations lumineuses en informations neuronales, une information externe qui n'était pas cognitivement significative devient une information interne cognitivement significative. Celle-ci est véhiculée dans le nerf optique et est traitée computationnellement à travers un certain nombre de niveaux jusqu'au niveau de traite-

ment cortical dans l'aire visuelle occipitale. C'est au cours de ce traitement que les images se forment. Dans ce cadre, on a développé de profondes théories de la construction perceptuelle des formes.

T. Poggio a insisté sur le fait que le problème central de la vision est ce que l'on appelle un *problème inverse*. Vous avez un monde externe avec des objets dans l'espace à trois dimensions, des objets colorés et texturés occupant une certaine portion d'espace, présentant des discontinuités qualitatives, etc. Tout cela se trouve encodé dans le signal lumineux, arrive sur la rétine, est transformé par transduction, se convertit en fréquences de *firing* neuronal. Ensuite, des algorithmes mentaux reconstruisent à partir de là la structure qualitative du monde externe. C'est cela le problème inverse, un peu comme dans le mythe platonicien de la caverne: le monde se projette sur la rétine et à partir de cette projection le système cognitif doit inférentiellement reconstruire le monde. Or s'il est facile de faire une projection, remonter à sa source est extraordinairement difficile. On est encore très loin de comprendre non seulement les mécanismes neurophysiologiques mais même la géométrie qu'il y a derrière ces problèmes.

Il y a un auteur que j'aime particulièrement. Il est hélas mort prématurément d'une leucémie, mais il avait eu le temps de s'imposer comme l'un des principaux maîtres de la théorie moderne de la perception. Il s'agit de David Marr qui travaillait au M.I.T. Marr a introduit trois niveaux essentiellement différents de représentation (évidemment, dans le détail, il y en a beaucoup plus). Le premier est essentiellement le niveau rétinien. C'est un niveau 2D, bi-dimensionnel, que Marr appelle l'esquisse primaire (*primal sketch*). Si on simplifie et, en particulier, si on oublie les couleurs, on peut considérer que l'input en est un *pattern plan* d'intensité lumineuse $I(x, y)$ discrétisé au niveau des photorécepteurs (pensez à un écran pixélisé). C'est là votre donnée de base, le signal initial. Le premier niveau explicite la morphologie et l'organisation géométrique de ce signal de façon à pouvoir opérer toute une série d'opérations postérieures, en particulier des opérations de segmentation, d'identification d'objets et de parties d'objets, etc. Ensuite, il y a un second niveau qui est intermédiaire entre le niveau bidi-

mensionnel et le niveau tridimensionnel des objets volumiques dans l'espace, et que Marr a appelé pour cela 2-1/2 D. C'est en fait celui des formes comme phénomènes purs que j'évoquais tout à l'heure. Il représente le monde externe comme composé de surfaces visibles remplies de qualités sensibles et se déplaçant dans l'espace extérieur. Il s'ensuit que ce n'est plus un niveau sensoriel puisque ces surfaces sont des objets distaux et non proximaux. Mais s'il n'est pas sensoriel il n'est pas non plus objectif au sens fort. C'est un niveau purement morphologique, celui de l'apparaître phénoménologique. Il y a enfin le troisième niveau qui est celui des modèles dits 3D, tri-dimensionnels. C'est le niveau proprement objectif des choses réelles, des volumes matériels externes dans l'espace à trois dimensions. C'est à partir de lui qu'opèrent les niveaux cognitifs supérieurs et que, par exemple, s'effectuent la catégorisation des formes, les rapports entre langage et perception, entre perception et action, etc.

C'est sur ces trois types de niveaux que j'aimerais maintenant faire quelques remarques rapides. D'abord, il faut bien avoir conscience de l'énorme difficulté du problème. Car qu'est-ce en définitive qu'une image? Nous avons vu que c'est un système de discontinuités qualitatives. Mais le signal optique, lui, est très bruité et ne possède pas de "bonne" structure géométrique. L'œil est une machine géométrique qui doit *reconstruire* les formes à partir des signaux, et pour ce faire construire des discontinuités. Comment donc détecter des discontinuités au niveau du signal rétinien? Marr a fait à ce propos la profonde remarque suivante (Marr 1982). Considérons une fonction, par exemple une fonction intensité de dimension 1, possédant une discontinuité, c'est-à-dire en fait une variation très brutale. Sa dérivée $f'(x)$ présente alors un pic extrêmement aigu autour de la discontinuité et sa dérivée seconde $f''(x)$ traverse la valeur zéro en l'encadrant par deux pics extrêmement aigus, l'un positif et l'autre négatif. Pour des raisons complexes, à la fois algorithmiques et physiologiques, Marr a considéré qu'on disposait là d'un critère fondamental de détection des discontinuités — qu'il a appelé le critère de *zero-crossing*. Il a généralisé cette idée à deux dimensions en introduisant en plus le concept de *lissage multi-échelle*. Le signal lumineux est

en effet un signal complexe, bruité et structuré à plusieurs échelles différentes. Pour en reconnaître la structure, vous êtes obligé de différencier les différentes échelles. Pour ce faire vous lissez le signal en effectuant des convolutions avec des gaussiennes de largeurs appropriées (correspondant aux échelles), bref, vous filtrez le signal. Ensuite, vous prenez les dérivées secondes en appliquant l'opérateur différentiel laplacien. Vous remarquez alors que les opérations "dérivée seconde" et "lissage" *commutent*: prendre le laplacien du pattern $I(x, y)$ lissé par convolution avec une gaussienne, c'est la même chose que de prendre le laplacien de la gaussienne et de faire la convolution avec $I(x, y)$. Or le profil du laplacien d'une gaussienne ressemble aux profils récepteurs des cellules ganglionnaires de la rétine. Comme celles-ci opèrent par filtrage sur le signal, le critère de *zero-crossing* se trouve ainsi empiriquement (neurophysiologiquement) justifié.

Marr est mort trop prématurément pour prendre connaissance des développements de sa théorie. On a découvert que ce mécanisme de traitement du signal correspond en fait à une analyse du signal que les mathématiciens, les physiciens et les ingénieurs pratiquent beaucoup depuis quelques années, à savoir une analyse en ondelettes. Qu'est-ce à dire? Je ne puis en donner la définition, car c'est trop technique (voir Mallat 1989; Petitot 1990, 1994b). Disons simplement que, contrairement à l'analyse classique de Fourier (l'analyse harmonique connue de tous), l'analyse en ondelettes est un processus local et multi-échelle permettant d'extraire les discontinuités qualitatives encodées dans le signal. Le système visuel est phylogénétiquement adapté à l'extraction de discontinuités qualitatives objectives: telle est sa fonction principale. En conséquence, la description phénoménologique à la Husserl-Thom que j'ai esquissée est à la fois neurophysiologiquement et mathématiquement fondée.

Avec l'analyse morphologique on passe d'une représentation analogique et continue (l'image comme pattern d'intensité bi-dimensionnel) à une représentation symbolique et discrète, ce qui est essentiel. Tous les processus cognitifs de niveau supérieur et, en particulier, les processus sémiotiques, sont de nature symbolique. Ce n'est qu'au

niveau symbolique et discret qu'un certain nombre d'opérations proprement structurales et formelles peuvent s'effectuer. Mais le symbolique repose essentiellement sur le discret alors que les niveaux inférieurs reposent sur le continu. Par conséquent, pour passer des bas niveaux aux hauts niveaux, il faut passer par un intermédiaire: le discontinu. Le niveau morphologique est intermédiaire entre les niveaux sensoriels périphériques et symboliques centraux et, sans lui, la cognition est incompréhensible. Le passage au symbolique est d'ailleurs précoce puisqu'il intervient, nous l'avons vu, dès le niveau rétinien. Contrairement à ce que croient la plupart des gens, il n'est pas conceptuel mais perceptif. L'analyse morphologique permet de sortir de l'impasse consistant à vouloir passer directement de l'image-signal à l'analyse conceptuelle sémantique. Beaucoup de théories actuelles, inspirées par exemple de l'intelligence artificielle, considèrent que le signal physique est directement traité par des mécanismes symboliques conceptuels et sémantiques. Les formes, avec tous leurs caractères géométriques, apparaissent alors comme par magie, comme issues d'une sorte d'harmonie préétablie entre le physique et le symbolique. Ces théories sont "top-down", "descendantes": des représentations de haut niveau y interprètent directement les données sensorielles. Au contraire, la théorie de Marr est "bottom-up", "ascendante": c'est une théorie morphogénétique et émergentielle selon laquelle la structure conceptuelle de l'image est reconstruite à partir de la structure morphologique dégagée par la détection des discontinuités qualitatives.

CONCLUSION

Une fois que l'on dispose d'une théorie de la forme qui est compatible d'une part avec les théories physiques de l'auto-organisation, d'autre part avec les théories cognitives de la perception, et enfin, troisièmement, avec les descriptions phénoménologiques pures, on peut, me semble-t-il, aborder la question des investissements sémiotiques des formes. Je me bornerai à dire pour conclure que la scission entre une physique de la matière et une sémiotique de la forme, se trouve en passe d'être présentement abolie. La forme qui, dans son rapport intrinsèque au sens, avait été

éliminée par la physique, est en train de faire retour. C'est dire que les sciences de la nature sont en train de se réapproprier leur dehors et de s'unifier avec certaines sciences humaines. Toute une conception du monde s'en trouve changée. À travers le cognitivisme, l'intelligence artificielle, la physique qualitative, etc., les sciences psychologiques sortent enfin de leur solipsisme séculaire pour aller à la rencontre du monde. Réciproquement, à travers les théories de l'organisation, la morphodynamique, etc., les sciences physiques dépassent leur réductionnisme positiviste pour aller à la rencontre du mental. Par ces dépassements complémentaires, ces deux types de sciences se retrouvent sur l'interface des formes-phénomènes qui sont des objets sémio-physiques doublement émergents du côté du sujet et du côté du monde. La signification de ce "tournant morphodynamique" est que la part maudite aristotélicienne qui s'était reterritorialisée chez Leibniz, Goethe, Peirce, Brentano, Husserl et le structuralisme contemporain, de Jakobson à Lévi-Strauss et Greimas, cette part maudite qui n'avait pu jusqu'ici être développée que dans des disciplines revendiquant un statut scientifique *sui generis* opposé à celui des sciences de la nature, se trouve intégrée désormais dans des sciences de la nature élargies, et cela non pas à la suite d'une sorte de coup de force, mais à la suite d'importantes conquêtes scientifiques. C'est un progrès scientifique majeur qui légitime désormais une conception réaliste de la structure sémiotique des formes.

NOTE

1. Ce texte reprend essentiellement ma communication du Congrès de fondation de l'AIISV, à Blois. J'ai choisi d'en conserver le style oral.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALVAREZ, L., P. L. LIONS, J. M. MOREL (1992), "Image selective smoothing and edge detection by non linear diffusion, *SIAM J. Numer. Anal.* 29: 845-866.

- HOLENSTEIN, E. (1992), "Phenomenological Structuralism and Cognitive Semiotics", *Scripta Semiotica* 1: 133-158.
- HUSSERL, E. (1900-1901), *Logische Untersuchungen*, Berlin.
- HALLE, M. N. (1969-1974), *Recherches logiques*, Paris, Presses Universitaires de France.
- KANT, I. [1790] (1913), *Kritik der Urtheilskraft*, Kants gesammelte Schriften, Band V, Preussische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Georg Reimer;
- (1979), *Critique de la faculté de juger*, trad. A. Philonenko, Paris, Vrin.
- LÉVI-STRAUSS, C., D. ERIBON (1988), *De près et de loin*, Paris, Odile Jacob.
- MALLAT, S. G. (1989), "Multifrequency Channel Decompositions of Images and Wavelet Models", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 37 (12): 2091-2110.
- MARR, D. (1982), *Vision*, San Francisco, Freeman.
- PETITOT, J. (1989a), "Structuralisme et phénoménologie", dans *LTC 1989*, 345-376.
- (1989b), "Forme", *Encyclopædia Universalis*, XI, Paris, 712-728.
- (1990), "Le Physique, le morphologique, le symbolique. Remarques sur la vision", *Revue de Synthèse* 1-2: 139-183.
- (1991), *La Philosophie transcendantale et le problème de l'objectivité*, Entretiens du Centre Sèvres (père F. Marty edit.), Paris, Éditions Osiris.
- (1992a), *Physique du sens*, Paris, Éditions du CNRS.
- (1992b), "Matière-Forme-Sens: un problème transcendantal", dans J. GAYON et J. J. WUNENBURGER (edits), *Les figures de la forme*, Paris, L'Harmattan.
- (1993a), "Topologie phénoménale. Sur l'actualité scientifique de la *phusis* phénoménologique de Maurice Merleau-Ponty", dans F. HEIDSIECH (edit.), *Merleau-Ponty. Le philosophe et son langage*, *Cahiers de recherches sur la philosophie et le langage* 15: 291-322.
- (1993b), "Phénoménologie naturalisée et Morphodynamique: la fonction cognitive du synthétique *a priori*", dans *Philosophie et sciences cognitives* (J.-M. SALANKIS edit.), *Intellectica* 17: 79-126.
- (1994a), "Phenomenology of Perception, Qualitative Physics and Sheaf Mereology", dans R. CASATI, B. SMITH, G. WHITE (edits), *Philosophy and the Cognitive Sciences*. Proceedings of the 16th international Wittgenstein Symposium, Vienna: 307-408.
- (1994b), "La Sémiophysique: de la physique qualitative aux sciences cognitives", dans M. PORTE (edit.), *Passion des formes*, Fontenay-St-Cloud, ENS Éditions: 499-545.
- (1994c), "How can Physical Symbols Act upon Semiotic Structure and "Visualized" Meanings?", dans G. GÜZELDERE and St. FRANCHI (edits), "Bridging the Gap", *Where Cognitive Science meets Literary Criticism (Herbert Simon and Respondents)*, *Stanford Humanities Review Suppl.* 4 (1): 96-98.
- (1994d), "Natural Dynamical Models for Visual Morphology, Topological Syntax and Cognitive Grammar", dans S. LEVI ALDI et C. BERNARDELLI (edits), *Representation: Relationship between Language and Image*, Singapore, World Scientific: 187-208.
- (1995a), "Morphodynamics and Attractor Syntax. Dynamical and morphological models for constituency in visual perception and cognitive grammar", dans T. van GELDER et R. PORT (edits), *Mind as Motion*, Cambridge, Mass., MIT Press: 227-281.
- (1995b), "La réorientation naturaliste de la phénoménologie", *Sciences cognitives et phénoménologie* (J. Petitot edit.), *Archives de philosophie* 58/4: 631-658.
- PETITOT, J., B. SMITH (1991), "New Foundations for Qualitative Physics", dans J. E. TILES, G. J. MCKEE et G. C. DEAN (edits), *Evolving Knowledge in Natural Science and Artificial Intelligence*, London, Pitman: 231-249.
- PETITOT, J. (edit.) (1989), *Logos et théorie des catastrophes*, Colloque de Cerisy en l'honneur de R. Thom, Genève, Éd. Patino.
- RS (1990), "Sciences cognitives: quelques aspects problématiques" (J. Petitot edit.), *Revue de Synthèse* IV, 1-2.
- SMITH, B. (edit.) (1982), *Parts and Moments. Studies in Logic and Formal Ontology*, Vienne, Philosophia Verlag, Analytica.
- SMITH, B. (edit.) (1988), *Foundations of Gestalt Theory*, Munich, Philosophia Verlag.
- THOM, R. (1972), *Stabilité structurelle et morphogénèse*, New York, Benjamin, Paris, Ediscience.
- THOM, R. (1980), *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, Christian Bourgois.
- THOM, R. (1988), *Esquisse d'une sémiophysique*, Paris, InterÉditions.