

LANGAGES

25^e ANNÉE

REVUE TRIMESTRIELLE

SEPTEMBRE 91

103

L'objet sens et réalité

par

Jean-Claude Coquet, Jean Petitot

et

J.-F. Bordron, M.-J. Borel, J.-P. Desclés,
S. E. Larsen, J. Poulain

Larousse

SYNTAXE TOPOLOGIQUE ET GRAMMAIRE COGNITIVE ¹

Introduction

On connaît la célèbre affirmation de Claude Lévi-Strauss : « les sciences humaines seront structurales ou ne seront pas ». Nous aimerions lui en adjoindre une autre : « les sciences humaines seront des sciences naturelles ou ne seront pas ». Evidemment, sauf à en revenir à un réductionnisme dogmatique, une telle affirmation n'est soutenable que si l'on peut suffisamment généraliser le concept classique de « naturalité », jusqu'à y intégrer, comme des phénomènes naturels, les phénomènes d'organisation structurale.

Tel est l'une des intentions principales du programme de recherche de la *Morphodynamique* développé à la suite des propositions et des travaux de René Thom. Comme nous l'avons montré dans un certain nombre de nos précédents travaux ², à partir du moment où l'on dispose d'une théorie *naturaliste* des processus de production des formes naturelles ainsi que d'une modélisation mathématique appropriée (i.e. compatible aux théories *physiques* des substrats matériels où s'implantent et d'où émergent ces formes), il devient possible d'élaborer un *structuralisme dynamique et génétique* permettant de rendre compte de l'émergence des structures.

Parce que naturalistes et dynamiques, de telles approches modifient profondément l'épistémologie des disciplines structurales. En effet, celles-ci ont toujours vécu sur l'idée (au fond néo-aristotélicienne) que les structures émanent d'une « forme » purement relationnelle qui s'implante dans une « matière » amorphe lui étant ontologiquement étrangère. Il y a là un *dualisme* forme / matière — dualisme à l'origine du postulat structuraliste bien connu du primat ontologique de la forme sur la matière — que vient remettre en cause une science naturaliste des structures. Notre idée fondamentale est que *la forme est le phénomène de l'(auto)-organisation de la matière*, autrement dit que la substance n'est pas une matière (une hylé) où vient s'implanter une forme ontologiquement autonome mais bien plutôt une matière (un substrat) dynamiquement (auto)-organisée.

Pour qualifier ce passage opéré par le structuralisme dynamique d'un idéalisme formaliste — à base logico-algébrique — à un naturalisme non réductionniste — mais

1. Ce travail est issu du Séminaire sur *Le Structuralisme dynamique* de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales que nous coordonnons avec Jean-Claude Coquet. Une version préliminaire en a été présentée et discutée lors de la première Journée d'Etude (9 novembre 1990) du Groupement de Recherche CNRS *Sciences Cognitives de Paris* dirigé par Jean-Pierre Desclés et coordonné par Georges Vignaux. Il a pu être approfondi lors d'un séjour au *Seminar on General Semiotics* de l'Université d'Aarhus dont Per Aage Brandt est le responsable. Sa version anglaise a été présentée à l'*International Center for Semiotic and Cognitive Studies* de l'Université de San Marino lors du *Workshop Motivation in Language* (12-14 décembre 1990). Je remercie Umberto Eco, Mark Johnson, George Lakoff, Leonard Talmy et Patrizia Violi pour les discussions enrichissantes que j'ai pu avoir avec eux à cette occasion.

2. Cf. notre bibliographie.

néanmoins à base physique —, nous avons proposé de compléter l'expression de « Logique du Sens » par l'expression de « Physique du Sens ». Dans une physique du sens — ce que René Thom appelle une « sémio-physique » —, le type d'objectivité des structures change de statut. Les structures sémio-linguistiques ne sont plus considérées comme des objets formels devant être mimés par des structures logico-combinatoires et algébriques analogues, mais bien plutôt comme des phénomènes naturels qui, au même titre que les phénomènes physiques, chimiques, thermodynamiques ou biologiques, doivent être objectivés, théorisés et modélisés avec des concepts et des outils mathématiques qui n'ont aucune raison d'appartenir aux théories des langages formels.

Ces dernières années, le point de vue morphodynamique sur les structures sémio-linguistiques a convergé avec certaines orientations maîtresses des sciences cognitives. Cela n'est évidemment pas dû au hasard. En effet, les sciences cognitives se proposent de naturaliser les structures, les actes et les processus mentaux constitutifs des représentations et de leur intentionalité, du jugement, du raisonnement, de l'apprentissage, des relations entre syntaxe et sémantique, etc. Pour ce faire, elles ont commencé par admettre la thèse que les représentations mentales appartenaient à un langage interne possédant les propriétés d'un langage formel. Cette thèse, caractéristique du paradigme « symbolique » — aussi dit « classique » — des sciences cognitives, conduit à une ontologie formaliste des structures, à un dualisme du physique (le neuronal) et du symbolique (les structures mentales) qui est un avatar du dualisme entre matière et forme. Mais, ces derniers temps, le paradigme symbolique s'est trouvé supplanté par le paradigme « sub-symbolique » — aussi dit « connexionniste » — qui cherche à comprendre les structures symboliques comme des structures émergeant des dynamiques sous-jacentes à travers des phénomènes d'(auto)-organisation. C'est donc une sorte de « thermodynamique neuronale du mental » qui devient l'objet d'étude privilégié. Or il est facile de voir que les modèles connexionnistes retrouvent sur bien des points, tant mathématiques qu'épistémologiques, les modèles morphodynamiques³ qui les ont précédés.

Un autre courant des sciences cognitives convergeant avec le point de vue morphodynamique est celui de la *grammaire cognitive* qui étudie de façon privilégiée l'ancrage perceptif des structures linguistiques. Ce n'est évidemment pas un hasard si ce dernier courant est lui-même en train d'établir sa jonction avec le courant connexionniste. Il y a là un ensemble pertinent de solidarités débouchant sur un tournant morphodynamique et cognitif du structuralisme sémio-linguistique.

Dans ce travail, plutôt que de développer des problèmes généraux de morphodynamique structurale et cognitiviste, nous nous focaliserons sur un problème très précis (que l'on jugera peut-être trop précis) qui nous paraît être assez représentatif du changement de paradigme que nous venons d'évoquer. Nous nous proposons d'indiquer comment les modèles morphodynamiques interviennent très naturellement dès que l'on se propose de conférer un statut mathématique rigoureux aux schèmes topologiques et dynamiques fondant la *grammaire cognitive*. Nous prendrons comme principale référence la théorie de Ronald Langacker⁴. Nous voudrions montrer :

3. Sur les liens entre le connexionnisme et les modèles morphodynamiques, cf. Visetti [1990] et Petitot [1989d], [1989g].

4. Sur les liens généraux que la grammaire cognitive de Ray Jackendoff, Leonard Talmy ou Ronald Langacker peut entretenir avec les modèles morphodynamiques de syntaxe topologique, cf. Petitot [1989d], [1989h], [1989i].

(i) que le tournant cognitif de la linguistique conduit à des problèmes nouveaux, *totalemment inédits*, ayant beaucoup plus à voir avec des problèmes de physique, d'analyse du signal ou d'« information processing » qu'avec des problèmes traditionnels de linguistique⁵, et

(ii) que les modèles morphodynamiques peuvent apporter beaucoup dans la résolution de ces problèmes.

I. La question de l'ancrage perceptif du sémantisme langagier et de la structure conceptuelle.

L'une des principales difficultés de la grammaire cognitive (GC) est de trouver des outils mathématiques adéquats pour décrire l'information topologique et dynamique — en fait l'information morphologique — fournie par la perception et traitée (« processée ») par la sémantique des langues naturelles. Le contenu de la perception est corrélé à une ontologie qualitative, une phénoménologie, du monde naturel. Le problème est par conséquent :

i) d'ancrer le langage naturel dans cette ontologie qualitative, et

ii) d'en effectuer une description mathématique précise.

Ce programme de recherche — qui est partie intégrante de celui de la morphodynamique — s'accorde avec les nouveaux courants de la linguistique cognitive. Par exemple, il admet avec Ray Jackendoff qu'il existe *une structure conceptuelle*, c'est-à-dire un niveau cognitif profond de représentation où la perception, l'action et le langage deviennent compatibles. Cette structure conceptuelle transforme le monde physique en un monde « projeté » — en un monde phénoménologique morphologiquement structuré — relevant d'une ontologie qualitative⁶.

Une des principales conséquences du fait que la langue naturelle se trouve enracinée dans une telle base morphologique est, en ce qui concerne les structures syntaxiques, *l'hypothèse localiste*. L'hypothèse localiste — qui se trouve au cœur de la partie syntaxique du programme de recherche de la sémio-linguistique morphodynamique — affirme que *les relations de position (tant statiques que dynamiques) pouvant exister entre des domaines locaux de l'espace-temps jouent le rôle d'archétypes — de schèmes de base — pour les structures syntaxiques*⁷. Nous rencontrons la même idée chez Ray Jackendoff lorsqu'il affirme, suivant Gruber, que « in any semantic field of [EVENTS] and [STATES] the principal event-, state-, path- and place-functions are a subset of those used for analysis of spatial location and motion »⁸.

Le point de vue morphodynamique s'accorde aussi avec Leonard Talmy sur le fait que les classes grammaticales *fermées* (telles que les prépositions, les auxiliaires modaux, les relations grammaticales, etc.) *spécifient des contenus sémantiques*, d'une

5. Ces problèmes sont même si peu linguistiques en apparence qu'il faudrait forger un néologisme pour parler des bases cognitives du langage. L'écart est aussi grand entre ces bases et la « vraie » linguistique qu'entre, par exemple, la physique fondamentale et la biologie organique.

6. Sur le point de vue de Ray Jackendoff et son rapport à la phénoménologie, cf. Petitot [1989d], [1989h].

7. Pour une histoire et une évaluation de l'hypothèse localiste, des grammairiens byzantins (Maxime Planude et Théodore Gaza) jusqu'à Hjelmslev et Anderson, cf. Anderson [1971], [1975], Hjelmslev [1935], Petitot [1985a].

8. Jackendoff [1983].

nature très spéciale et très profonde, appartenant à l'ontologie qualitative du monde naturel. Comme cela est très bien expliqué dans « Relation of Grammar to Cognition » et dans « How Language Structures Space »⁹, il existe une information positionnelle et topologique complexe, ainsi qu'une schématisation morphologique sophistiquée, qui se trouvent spécifiées par la classe fermée des prépositions. « Grammatically specified structuring appears to be similar, in certain of its characteristics and function, to the structuring in other cognitive domains, notably that of visual perception ». Nous reviendrons en X.3. sur les liens existant entre ce que Leonard Talmy appelle *Force Dynamics* et le système modal.

Nous avons donc besoin pour la linguistique cognitive d'une bonne « topologie cognitive » au sens de Lakoff, et, pour cela, d'une bonne théorie mathématique des images et des schèmes figuratifs qui organisent les structures sémantiques. Cette « topologie » doit en fait être aussi une dynamique. Elle doit inclure plus de géométrie que la simple topologie, par exemple aux niveaux des structures différentiables, ou des propriétés de convexité, ou des propriétés de transversalité, ou encore des structures métriques. Tout cela relève de ce que nous entendons par « morphodynamique cognitive ».

La question est : existe-t-il des mathématiques adéquates et non triviales pour la morphodynamique cognitive ? La réponse est : oui. Ces mathématiques existent. Elles sont assez techniques : théorie qualitative des systèmes dynamiques, théorie des bifurcations, théorie des singularités, etc. En fait, ce sont les mathématiques fondant la modélisation connexionniste. Mais elles ont été utilisées dans la schématisation et la modélisation morphodynamiques du structuralisme sémio-linguistique longtemps avant la vague connexionniste.

II. Des bases perceptives aux archétypes cognitifs

1. La théorie perceptive de David Marr

Pour relier la langue naturelle et la perception naturelle, nous avons besoin d'une bonne théorie de cette dernière. Notre propos n'étant pas de traiter ce point ici, nous nous contenterons d'évoquer brièvement à son sujet les principaux aspects de la théorie de David Marr¹⁰.

Selon Marr, la « quintessence » de la vision — conçue comme dispositif biologique de traitement d'information — est d'extraire par corrélation de l'information sur les objets du monde objectif externe à partir de la façon dont la lumière réfléchiée par les surfaces physiques engendre des patterns 2D (bidimensionnels) $I(x,y)$ de luminance. A travers la transduction effectuée par les photorécepteurs, ces patterns se trouvent discrétisés (comme les pixels d'un écran). La seule information *explicite* est, à l'entrée du système, le signal optique $I(x,y)$. A la sortie opèrent des représentations de haut niveau effectuant des tâches cognitives supérieures : différenciation d'objets, repérage de positions et de mouvements 3D (tridimensionnels) objectifs, désambiguïsation des

9. Talmy [1978], [1983].

10. Pour des précisions sur les modèles mathématiques de perception visuelle, cf. Petitot [1990a] et, surtout, sa bibliographie. Pour une introduction générale à la théorie de la vision, on pourra consulter par exemple les excellents Pinker [1984], Brady [1982], Ballard-Brown [1982], Ullman [1984], Stillings et al. [1987].

scènes par inférence, reconnaissance de formes d'objets, regroupement par classes de ressemblance (catégorisation), etc. Comment s'opère donc dans une théorie ascendante comme celle de Marr, le passage du niveau du signal à celui du monde phénoménologique de l'ontologie qualitative ?

Marr introduit plusieurs niveaux de représentation explicitant certains aspects de l'information encodée dans les patterns $I(x,y)$. Parmi ceux-ci trois sont fondamentaux.

(i) Le premier niveau — dit niveau 2D du « primal sketch » ou de *l'esquisse primaire* — est celui du traitement du signal optique $I(x,y)$. Il s'agit d'en expliciter la morphologie et l'organisation géométrique de façon à pouvoir opérer des segmentations qui serviront de support aux phases intermédiaires et aux phases finales, cognitives et inférentielles, d'interprétation, de reconnaissance, de compréhension, etc. Ce niveau se décompose lui-même en (au moins) deux sous-niveaux.

(i)-a. Au niveau du « raw primal sketch », il s'agit essentiellement d'une analyse locale du pattern $I(x,y)$ en termes de discontinuités qualitatives : segments de bords, terminaisons de bords, discontinuités d'orientation de bords (coins), petits domaines fermés (« blobs »), petits segments de barres, etc. On sait maintenant que cette analyse précoce et de bas niveau est déjà authentiquement morphologique. Dans la transduction rétinienne, certaines classes de cellules ganglionnaires (les axones de ces dernières composent le nerf optique) opèrent ce qui est appelé en mathématiques une analyse en séries d'ondelettes du signal optique. L'analyse en séries d'ondelettes est une sorte d'analyse de Fourier qui, contrairement à l'analyse de Fourier classique, est locale et multiéchelle. Sa fonction principale est d'extraire du signal les discontinuités qualitatives qui s'y trouvent encodées. Il est bien connu que le champ récepteur des cellules ganglionnaires est organisé par un ago-antagonisme Centre/Périphérie¹¹. De telles cellules opèrent sur le signal $I(x,y)$ au moyen d'une convolution $\Delta G * I$ par le Laplacien d'une Gaussienne. Le dispositif dit du *zero-crossing* de Marr permet alors d'extraire des discontinuités qualitatives locales. Si ces discontinuités sont stables par variation d'échelle, elles peuvent être interprétées comme objectives¹².

(i)-b. Au niveau du « full primal sketch », ces éléments locaux (en général en mouvement) se trouvent agrégés et organisés, ce qui engendre des effets gestaltistes bien connus : bords virtuels, etc.

(ii) Le second niveau, dit niveau 2-1/2D (pour bien montrer qu'il est intermédiaire entre le niveau 2D et le niveau 3D), est le niveau essentiel de la théorie. Marr l'appelle d'ailleurs le « point pivot » de la « perception pure ». C'est un niveau globalement organisé où s'intègrent plusieurs computations modulaires effectuées sur l'esquisse

11. Cf. par exemple Buser-Imbert [1987].

12. La découverte du fait que le système rétinien effectue une analyse en séries d'ondelettes du signal optique est à ranger, selon nous, parmi les plus importantes découvertes de ces dernières années. Se situant à l'interface (i) de la neurophysiologie, (ii) des technologies (tant physiques qu'informatiques) d'analyse du signal, (iii) des mathématiques pures, elle montre comment les signaux peuvent véhiculer de la géométrie (au sens morphologique) et comment celle-ci peut en être extraite. On sait depuis Thom que le concept morphologique clef est celui de discontinuité qualitative : toute forme est un système de discontinuités qualitatives sur un espace substrat bien choisi. Il vient de devenir un concept clef des théories du signal. On peut même montrer (cf. Meyer [1988], [1989] et Mallat-Zhong [1989]) que, sous des conditions très générales, on peut reconstruire une image à partir de ses discontinuités qualitatives extraites à plusieurs échelles différentes. Ce fait fondamental commence à expliquer l'une des grandes énigmes de la perception : comment une analyse du signal (de type analyse de Fourier améliorée) peut-elle être en même temps une construction de forme ?

primaire : les contours des surfaces visibles, les textures, la stéréopsie, le mouvement, l'ombrage, etc. Il représente le monde externe comme composé de surfaces visibles remplies de qualités sensibles et se déplaçant dans R^3 . Il n'est ni strictement sensoriel (puisque les surfaces sont externes) ni strictement objectif (puisque les apparences sont internes). Il constitue *l'apparaître phénoménologique* comme tel. Il est donc d'essence proprement *morphologique*. C'est en particulier à ce niveau que certaines discontinuités objectives sont interprétées *comme des contours apparents d'objets*. Le processus de traitement des contours apparents est fondamental car il permet la transition de l'esquisse 2D aux modèles 3D en reconstruisant des formes, et des relations spatio-temporelles entre les formes, uniquement à partir de discontinuités qualitatives 2D¹³.

(iii) Le troisième niveau — dit niveau des modèles 3D — est celui, proprement objectif, des choses réelles, des volumes matériels et de leurs propriétés réales. C'est à partir de lui qu'opèrent les tâches cognitives supérieures et les constituants de la structure conceptuelle, par exemple la décomposition hiérarchique de formes en parties, la constitution de prototypes, etc. On peut faire l'hypothèse que la perception est un processing ascendant « 2D → 2-1/2D → 3D → Structure conceptuelle » possédant des feed-back descendants (anticipations, inférences, interprétations, etc.) « Structure conceptuelle → 3D → 2-1/2D ». Le niveau 2-1/2D serait donc la fin du processing perceptif proprement ascendant (d'où son importance).

Comme Marr l'a pointé à la fin de « Vision » et comme Jackendoff l'a souligné dans « Consciousness and the Computational Mind », c'est aux niveaux 2 1/2-D et 3D que la langue naturelle s'enracine dans les scènes perceptuelles. Cela est assez clair pour les objets. *Mais qu'en est-il des relations spatio-temporelles entre les objets ?* Nous pensons qu'il s'agit là d'un problème fondamental demeuré jusqu'ici non résolu.

Problème de base : *Comment est-il possible d'extraire des modèles 3D l'information relationnelle de nature topologique (positionnelle) et dynamique qui se trouve sémantiquement spécifiée au niveau grammatical ?*

Pour faire un parallèle historique, on pourrait dire que ce problème est assez analogue à celui que se posait un Michotte dans les années 40 à propos de la perception de la causalité. Comme l'a rappelé Michel Imbert dans son rapport sur les sciences cognitives en Europe, Michotte cherchait à montrer qu'il existait une « préfiguration dans les données sensorielles de notre conception spontanée du monde physique ». Il en va de même ici : *le fait que le langage soit ancrable dans la perception implique qu'il y ait une préfiguration perceptive des structures syntaxiques élémentaires.*

2. Le passage du morphologique au symbolique

Si l'on sait résoudre le problème de base, alors on peut arriver à comprendre l'ancrage du langage dans la perception. En effet, on peut chercher :

(i) à représenter sous forme *symbolique* l'information relationnelle de nature topologique et dynamique que l'on peut extraire des modèles 3D où elle se trouve encodée :

(ii) à insérer ces représentations symboliques dans des dispositifs *prédicatifs*.

13. Pour des détails techniques sur la façon dont on peut reconstruire une forme à partir de la famille de ses contours apparents (application de la théorie des singularités et de la théorie des jets), cf. Petitot [1990a].

Or, il existe d'ores et déjà des réponses satisfaisantes à ce problème. Telle, par exemple, celle proposée par J.P. Desclés dans ses travaux sur *les archétypes cognitifs*¹⁴.

Considérons un événement décrit par un énoncé comme « la feuille entre dans la pièce ». L'archétype cognitif associé à l'événement est la structure symbolique (conceptuelle, sémantique) représentée à la Figure 1.

SIT ₁ [y]	MOUVT	SIT ₂ [y]
$e_0 \text{ ex(Loc) } y$	→	$e_0 \text{ in(Loc) } y$

Figure 1 L'archétype cognitif [ENTRER]. (D'après Desclés [1990]).

Cette structure relie au moyen de la primitive dynamique MOUVT = « mouvement » une situation initiale SIT₁ [y] — où l'actant y (« feuille ») se trouve repéré par rapport au lieu Loc (« pièce ») par la relation positionnelle d'extériorité ex (le repérage est marqué par l'opérateur e_0) — à une situation finale SIT₂ [y] — où l'actant y se trouve repéré par rapport au lieu Loc par la relation positionnelle d'intériorité in. D'autre part, l'énoncé linguistique « la feuille entre dans la pièce » décrivant l'événement est une structure prédicative que l'on peut réduire à une expression formelle $P_2 T^2 T^1$ où P_2 est un prédicat binaire lexicalisé par le verbe « entrer dans », T^1 le terme nominal « la feuille » instanciant la relation grammaticale de sujet et T^2 le terme nominal « la pièce » instanciant la relation grammaticale d'objet indirect. J.P. Desclés a montré comment on peut réduire l'expression symbolique $P_2 T^2 T^1$ à l'expression MOUVT ($e_0 \text{ (ex Loc) } y$) ($e_0 \text{ (in Loc) } y$). Cette réduction réalise « une "compilation" de l'expression linguistique, encodée avec les contraintes grammaticales de la langue, dans un système de représentation sémantique organisé à l'aide des archétypes cognitifs »¹⁵. La compilation s'effectue au moyen d'un programme exprimé en termes de logique combinatoire à partir de la « loi lexicale » $P_2 = \Psi(B\Phi\Phi \text{ MOUVT})(Be_0) \text{ ex in}$ qui « a pour but d'exprimer la signification sémantique » de l'unité lexicale « entrer-dans »¹⁶.

III. Rappels de « Foundations of Cognitive Grammar » de Ronald Langacker¹⁷

1. En tant que « grammaire spatiale » et « grammaire naturelle », la GC est fondée sur l'hypothèse de schématicité, de figurativité, d'iconicité du langage naturel. Sa thèse est celle de la centralité de la sémantique : « Grammar (or syntax) does not constitute an autonomous formal level or representation » (p. 2), « Grammar itself

14. Cf. Desclés [1986], [1990].

15. Desclés [1990], p. 307.

16. Dans la loi lexicale définissant P_2 , « les primitives MOUVT, e_0 , ex et in [sont] « combinées » entre elles à l'aide de combinateurs ». B est le combinateur de composition défini par $BXYZ \rightarrow X(YZ)$, Φ est le combinateur d'intrication défini par $\Phi(XYZ)U \rightarrow X(YU)(ZU)$, Ψ est le combinateur défini par $\Psi XYZU \rightarrow X(YZ)(YU)$. X, Y, Z, U sont des expressions combinatoires quelconques.

17. Langacker [1987]. Pour des précisions sur les thèses de Langacker, cf. Petitot [1989h], [1989i]. Les références aux « Foundations » seront faites dans le texte.

(...) is inherently symbolic and hence meaningful » (p. 12), et, par conséquent, celle de la centralité de la structure conceptuelle : « Semantic structure is conceptualization tailored to the specification of linguistic convention » (p. 98). Les concepts sont des schèmes, des ensembles d'instructions (des routines) pour leur application. D'où une critique sévère (d'ailleurs souvent injuste) des approches formalistes et constructivistes du langage.

2. L'opération cognitive de base de la GC est le *scanning*, c'est-à-dire la *détection de contrastes et de discontinuités qualitatives*. Le scanning est « an ubiquitous process of comparison and registration of contrast that occurs continuously throughout the various domains of active cognitive functioning » (p. 116).

3. Les unités linguistiques sont définies par découpage dans des *domaines*, eux-mêmes édifiés sur des domaines *primitifs*. Les domaines primitifs — dits *domaines de base* — sont l'espace, le temps et les qualités sensibles (couleur, hauteur, etc.). « By definition, basic domains occupy the lowest level in hierarchies of conceptual complexity: they furnish the primitive representational space necessary for the emergence of any specific conception [au sens de conceptualisation] » (p. 149). Ces domaines sont dotés de structures *géométriques* (dimension, structure différentiable, distance, degré intensif, etc.) et donc, au niveau de complexité le plus primitif, les concepts sont des positions et des configurations dans des espaces géométriques de base. La GC repose par conséquent sur une approche typiquement *morphologique* du concept.

IV. Le scanning des choses

Evoquons brièvement la façon dont Langacker décrit en termes de scanning une chose, c'est-à-dire « a region in some domain » (p. 189). La description est en fait très gestaltiste. Le scanning discrimine un « profil » (forme) d'une « base » (fond) à travers la détection d'un « bord ». (Cf. Figure 2 page suivante).

Dans le cas de la perception visuelle, les événements élémentaires sont des sensations de brillance qui sont fonction des points du champ visuel, c'est-à-dire des valeurs, spatialement localisées, du degré d'une qualité sensible. Soient A et B deux tels événements et V_{AB} le vecteur résultant du scanning comparant A et B. $V_{AB} = (P, Q)$ possède deux composantes : l'une mesurant l'écart $P = \Delta p$ des positions respectives de A et de B, l'autre mesurant le contraste $Q = \Delta q$ entre les deux valeurs de la qualité « brillance ». On peut à partir de ces comparaisons élémentaires définir trois types de scanning.

(i) *The field scanning* (FS). L'écart $P = \Delta p$ entre points voisins est non nul, mais l'écart de qualité $Q = \Delta q$ est nul (i.e. il y a un jugement perceptif d'identité pour Q : homogénéité qualitative locale). On a donc $V_{AB} = (P = x, Q = 0)$ avec $x \neq 0$. Or, un principe cognitif général est que « the occurrence of a cognitive event facilitates its recurrence » (p. 210). Par récurrence, on scane ainsi le fond et son homogénéité globale.

(ii) *L'expanse scanning* (ES). C'est l'équivalent du field scanning, mais pour la région qu'est la forme (le « profil »). On a encore $V_{AB} = (P = x, Q = 0)$, mais pour une valeur nettement différente du degré de la qualité q . Ce scanning « establishes the qualitative uniformity of the dark area [on est dans le cas où « profil » = spot noir] as well as its spatial connectivity, thereby accounting for its recognition as a region » (p. 210).

(iii) *The periphery scanning* (PS). « This is a higher-order comparison chain that constitutes the perception of a boundary, i.e. an interface between two regions »

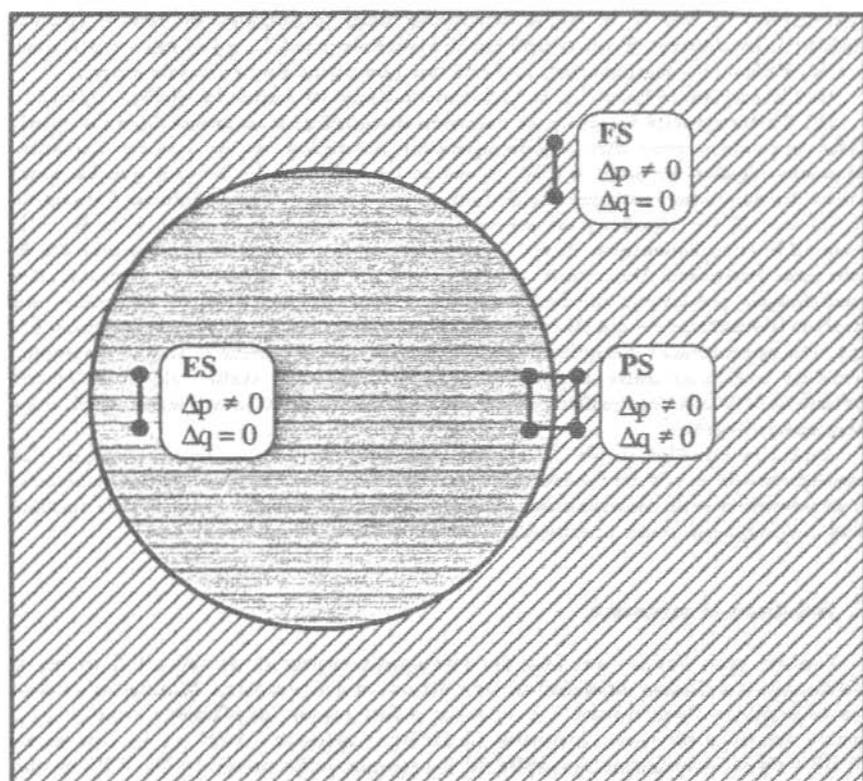


Figure 2 Le scanning d'une « chose » (c'est-à-dire d'une « région dans un domaine de base ») selon Langacker.

(p. 210). Il faut d'abord scanner des écarts de degré associés à des écarts de position traversant le bord du spot. Pour ces écarts, on a $V_{AB} = (P = x, Q = y)$ avec $x \neq 0$ et $y \neq 0$. Cela définit les *points bord* en tant que couples d'événements voisins (A_i, B_i) , (A_i appartient à FS et B_i à ES). Mais encore faut-il scanner le bord « as a continuous, line-like entity extending through the visual field » (p. 211). Pour ce faire, on compare des points bord voisins (A_i, B_i) et (A_{i+1}, B_{i+1}) . Soit P' leur écart spatial et Q' l'écart entre les deux valeurs $Q_i = y_i$ et $Q_{i+1} = y_{i+1}$ de l'écart Q . L'événement de comparaison $((A_i, B_i), (A_{i+1}, B_{i+1}))$ est du deuxième ordre relativement aux (A_i, B_i) . Le bord est défini par $V = (P' = z, Q' = 0)$.

On peut par conséquent :

- (i) scanner localement l'intérieur et l'extérieur de la forme cernée par le bord et.
- (ii) opérer la transition du local au global au moyen d'un processus de propagation en accord avec le principe cognitif général « occurrence facilitates recurrence ».

Mathématiquement, la description de Langacker s'accorde parfaitement avec la définition thomienne d'une *morphologie* comme système de bords (de discontinuités

qualitatives)¹⁸. Soit W la région considérée dans le domaine de base E (espace ambiant). Le substrat W est rempli par des qualités $q_1(w), \dots, q_n(w)$ qui varient avec $w \in W$. Phénoménologiquement, il existe une opposition fondamentale entre :

- (i) l'homogénéité locale i.e. la variation continue de toutes les qualités $q_i(w)$;
- (ii) l'hétérogénéité locale i.e. la variation discontinue d'au moins l'une des $q_i(w)$.

Cette opposition peut être topologiquement formalisée de la manière suivante. Appelons *régulier* un point $w \in W$ s'il existe un voisinage U de w tel que les $q_i(w)$ soient des fonctions *continues* sur U (homogénéité locale). Par définition, l'ensemble $R = \{ w \in W \mid w \text{ régulier} \}$ est un sous-ensemble *ouvert* de W . Soit $K = W - R$ l'ensemble complémentaire. K est un sous-ensemble *fermé* de W . Les points $w \in K$ sont dits *singuliers*. Dans tout voisinage U d'un point singulier w , certaines des qualités $q_i(w)$ présentent une *discontinuité* (hétérogénéité locale). K est un bord — un système d'interfaces — qui décompose W en régions qualitativement homogènes. En fait, ces oppositions : « régulier / singulier » et « ouvert / fermé », sont étroitement corrélées avec une autre opposition : « structurellement stable / structurellement instable ». Dans R les qualités $q_i(w)$ sont *stables*, mais à la traversée de K elles deviennent *instables*.

Ainsi, la description de Langacker est bien de nature morphologique. La conséquence de ce fait est *l'universalité cognitive des notions morphologiques concernant la structuration et la décomposition d'espaces qualitatifs par des discontinuités qualitatives : région, bord, centre / périphérie, interne / externe, forme, etc.*

V. Relations et processus

Comme nous l'avons vu, l'un des principaux enjeux de la GC est d'arriver à développer une théorie satisfaisante des relations et des processus. *Mais qu'est-ce donc que le profilage d'une relation ?* Langacker réduit toutes les relations (statiques) à quatre relations de base : l'identité $[A \text{ ID } B]$, l'inclusion $[A \text{ IN } B]$, la séparation $[A \text{ OUT } B]$ et l'association $[A \text{ ASSOC } B]$. La relation positionnelle $[A \text{ OUT } B]$ est une relation d'extériorité *sans repérage* de A par rapport à B . En revanche, la relation — essentielle — $[A \text{ ASSOC } B]$ est une relation positionnelle d'extériorité où A se trouve *repéré* par rapport à B (cf. Figure 3).

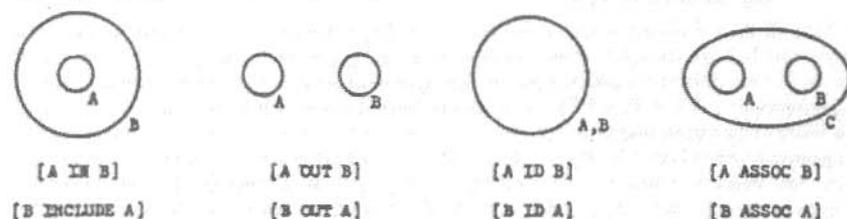


Figure 3 Les quatre relations positionnelles fondamentales selon Langacker.

18. En fait nous pouvons déjà trouver cette même description (mais évidemment non mathématisée) chez Carl Stumpf et dans la Troisième Recherche Logique de Husserl. C'est un des aspects importants de la généalogie phénoménologique de la morphodynamique cognitive. Cf. Petitot [1986d], [1989e].

Trois choses doivent être ici soulignées :

- (i) ces relations sont *positionnelles* ;
- (ii) elles sont *globales et informationnellement infinies* (car réalisées sur un continuum) ;
- (iii) la principale relation est celle, non classique, d'association.

Le problème principal est alors de scanner ces relations positionnelles, qui sont globales et informationnellement infinies, en satisfaisant à la contrainte fondamentale de n'utiliser que des *scannings locaux informationnellement finis* et des processus de propagation du local au global. Comme nous allons le voir, ce problème est hautement non trivial.

Supposons-le néanmoins résolu. Comment pouvons-nous alors analyser les processus ? L'idée directrice est celle de *profil temporel*, c'est-à-dire de profilage d'une séquence temporelle de relations elles-mêmes profilées. Considérons l'exemple standard du verbe [ENTRER]. Sa représentation schématique est, selon Langacker, celle de la Figure 4.

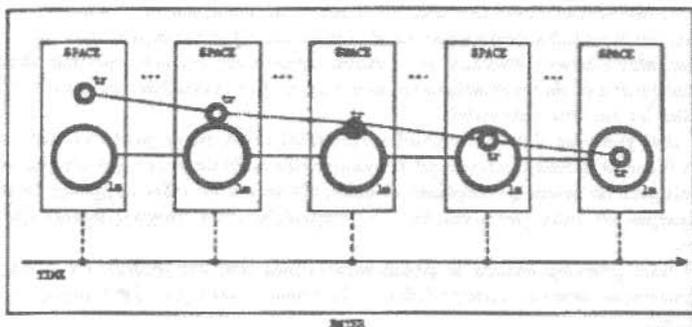


Figure 4 Le profilage temporel du processus [ENTRER] selon Langacker. (Comparer à la Figure 1).

Nous voyons clairement ici quel est le problème.

- (i) La perception fournit des scènes visuelles (modèles 3D).
- (ii) On peut schématiser ces scènes topologiquement et dynamiquement à la manière de Langacker. De cette façon on obtient une information morphologique.
- (iii) On doit extraire de cette information *morphologique* une information *conceptuelle* équivalente (au sens des théories des scripts et des frames) qui soit, elle, symboliquement représentable, par exemple au moyen d'un archétype cognitif.

Si donc nous voulons pouvoir effectivement décrire et expliquer l'ancrage du langage dans la perception, nous devons pouvoir disposer d'une théorie adéquate de la transition (ii) → (iii). C'est le problème de base. Conséquence directe des principes de la GC, il est totalement inédit en linguistique.

VI. Le problème de base

Nous pensons que la GC reste sur ce point insatisfaisante. Elle utilise sans les théoriser les propriétés holistiques (gestaltistes) de la vision qu'il s'agit d'expliquer. Précisons la difficulté.

D'après ce qui précède, un proto-actant positionnel¹⁹ est identifiable, dans la GC, à une *boule topologique* A dans un espace topologique M muni d'une certaine structure géométrique (en général beaucoup moins rigide que la structure euclidienne de R^3 , par exemple une structure différentiable). Si l'on se donne une configuration A_1, \dots, A_n de telles boules topologiques dans M, *qu'est-ce qui permet de profiler leurs relations de position ?* Autrement dit, *qu'est-ce qui permet de transformer leur configuration en forme ?*

On ne saurait trop insister sur l'importance et la non trivialité de ce problème. Dans une certaine mesure, si le point de vue formaliste symbolique a toujours prévalu dans les sciences du langage, c'est parce que l'on n'a jamais pu disposer d'alternative satisfaisante au concept *formel* de relation. *Si toute relation n'est objectivement pensable que comme relation formelle, alors le paradigme symbolique est le seul valable.* Si la GC se veut être une authentique alternative aux grammaires formelles et à leurs fondations cognitives symboliques, il est par conséquent *impératif* qu'elle puisse se fonder sur une conception *non formelle* des relations.

Ce problème de fond n'est pas exclusivement linguistique ou cognitif. C'est avant tout un problème *théorique* général, de nature mathématique : *peut-on oui ou non transformer en forme des configurations de domaines dans un espace de base de façon à ce que des algorithmes généraux de reconnaissance de formes puissent devenir des algorithmes généraux de reconnaissance de relations positionnelles abstraites ?* Il est non trivial pour les raisons suivantes.

(i) Il faut pouvoir définir le profil relationnel entre deux proto-actants positionnels A_1 et A_2 *sans* utiliser naïvement les propriétés holistiques et gestaltiques qui sont caractéristiques de notre perception visuelle. Ce serait en effet supposer le problème résolu puisque ce sont précisément ces propriétés (fort énigmatiques) qu'il s'agit d'éclaircir.

(ii) Il faut pouvoir définir le profil relationnel, qui est global, *au moyen d'algorithmes purement locaux* (compatibles à la thèse cognitive du scanning et de la propagation).

(iii) Il faut que ces algorithmes soient *universels* (non ad hoc).

(iv) Enfin, il faut qu'ils fournissent des *conditions nécessaires et suffisantes de nature locale pour l'identification des relations globales.*

Par conséquent, nous devons trouver une routine topologico-dynamique, cognitivement plausible et suffisamment générale, fondée sur un scanning local et un processus de propagation, qui puisse réduire la relation d'association, en tant que forme, à des critères locaux et informationnellement finis.

VII. La routine visuelle « diffusion de contour »

Il ne s'agit donc pas d'imaginer des critères géométriques simples et ad hoc permettant de savoir si, par exemple, deux régions sont externes ou internes l'une par rapport à l'autre. Cela est trivial et, ici, d'aucun intérêt. De même, il ne s'agit pas d'identifier des tokens de relation en les ramenant à des types relationnels stockés dans une mémoire à long terme. Le problème posé est d'une toute autre nature.

19. Nous avons proposé d'employer le terme de « proto-actant positionnel » pour désigner, en syntaxe topologique, les positions (source, but, etc.) susceptibles d'être spécialisées en actants ou en lieux. Ces proto-actants positionnels sont schématisés par des « régions » dans les schèmes de la GC.

Un ensemble de données théoriques et expérimentales (cf. par exemple Blum [1973], Psołka [1978], Koenderink [1984], Koenderink-van Doorn [1986]) convergent vers l'idée directrice que le *processus de genèse* d'une forme relationnelle repose sur un processus, bien connu en physique et en mathématiques, de *diffusion de contour*. Qu'est-ce que cela signifie ?

Comme routine visuelle basique et ubiquitaire, la diffusion de contour a été promue en particulier par Harry Blum dans son travail pionnier « Biological Shape and Visual Science »²⁰. La question initiale que se posait Blum était : « How do organisms describe and characterize other organisms' shapes ? ». Il s'agit là d'une capacité fondamentale de notre système visuel mais « in vision, we perform such biological shape operation naively. Our theory is implicit ». La difficulté vient de ce que nous ne connaissons pas le type de géométrie sous-jacente à de telles performances : « biology has no set of statements for its everyday spatial relations ». Or, « without a proper shape mathematics for biology, we are in the position that physics would have been in trying to develop mechanics without Euclidean geometry ». L'hypothèse est par conséquent qu'il peut y avoir une géométrie biologiquement plausible très différente de la géométrie euclidienne.

Mais quelle peut donc être la nature d'une telle mathématique des formes biologiques ? Blum part du constat : « Shapes are normally described by their boundaries ». Son idée de base est alors d'introduire un processus de diffusion de contour : chaque point du bord B de la forme S considérée devient le centre de diffusion d'une onde sphérique, et ainsi le contour se propage comme un front d'ondes. (Cf. Figure 5 page suivante).

Les principaux avantages de ce processus sont d'être local et d'engendrer ce que l'on appelle le *cût locus* (chez Blum « l'axe de symétrie ») (CL) de la forme S, c'est-à-dire l'ensemble des points atteints au même moment par la diffusion de contour en partant de deux points différents du bord. Le CL est le lieu des centres des disques maximaux inscriptibles dans S (cf. Figure 6 page 111).

Le CL est une structure bien intéressante.

- (i) C'est une construction locale, mais à partir de lui, grâce à la fonction rayon (i.e. la donnée en chaque point $x \in CL$ du rayon du disque maximal dont x est le centre), on peut reconstruire la forme globale S et, donc, résoudre le problème inverse.
- (ii) C'est un objet dynamique. Il est construit en suivant la propagation des fronts d'ondes, i.e. en suivant la croissance du rayon des disques maximaux (cf. Figure 7 page 111).
- (iii) Ses propriétés topologiques (singularités, etc.) permettent de reconstruire *plus* que les propriétés topologiques de S, par exemple ses propriétés de convexité (cf. Figure 7). On trouvera à la Figure 8 (page 112) quelques exemples de CL.

Notons également que le processus dynamique et bidimensionnel de diffusion de contour peut être représenté de manière statique et tridimensionnelle en transformant les fronts d'ondes en courbes de niveaux d'une surface (cf. Figure 9 page 112).

Les propositions théoriques de Harry Blum ont été partiellement confirmées expérimentalement par Psołka²¹. Le protocole expérimental était de demander aux sujets de pointer de manière réflexe à l'intérieur d'une forme. Les points d'impacts s'accumulent de façon spectaculaire sur le CL (cf. Figure 10 page 113).

Peut-être le défaut de la conception d'Harry Blum est-il d'être trop purement métrique. Un éminent spécialiste de la vision, Jan Koenderink, en a proposé une

20. Blum [1973].

21. Cf. Psołka [1978].

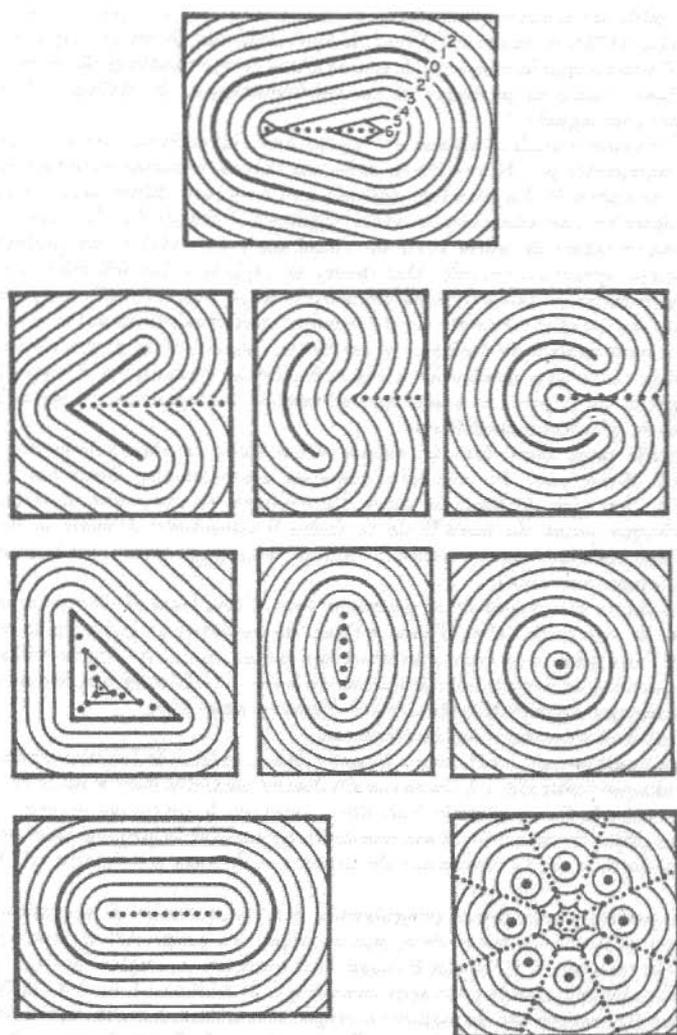


Figure 5 Le processus de diffusion de contour selon Blum. Les lignes en pointillés représentent le cut locus de la forme (D'après Blum [1973]).

version plus souple. L'idée de Koenderink (qui se considère lui-même comme l'un des successeurs de Blum) dans les articles fondamentaux « The Structure of Images »²² et

22. Koenderink [1984].

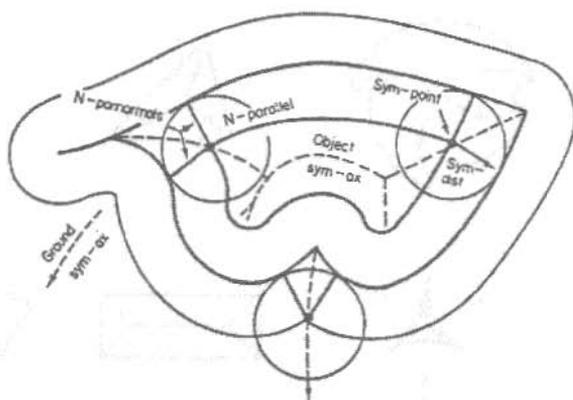


Figure 6 Le concept de cut locus (ou d'axe de symétrie, de « sym-ax ») selon Blum. On notera que les domaines de concavité de la forme engendrent des composantes externes des cut locus. (D'après Blum [1973]).

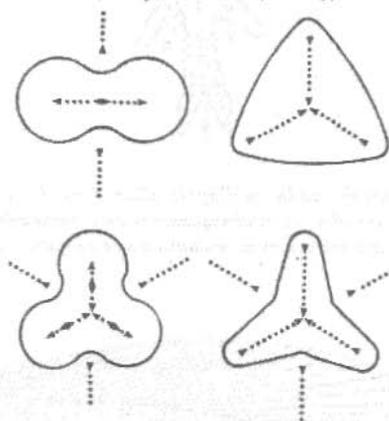


Figure 7 Le cut locus comme objet dynamique. Au cours du processus de diffusion de contour, il est progressivement engendré suivant la croissance des disques maximaux (sens des flèches). Les singularités du CL (par exemple un point triple ou un point d'arrêt) renseignent sur la forme génératrice S. Les composantes connexes externes du CL sont associées aux parties concaves de S. (D'après Blum [1973]).

« Dynamic Shape »²³ est de structurer une image $I(x,y)$ en la plongeant dans une famille $I_t = J$ (une déformation) allant de $I_0 = I$ à une forme I_1 indifférenciée (une boule topologique). L'évolution inverse $I_1 \rightarrow I_0$ représente alors un processus génétique de différenciation menant de l'indifférencié à la forme I . La manière la plus simple

23. Koenderink, van Doorn [1986].

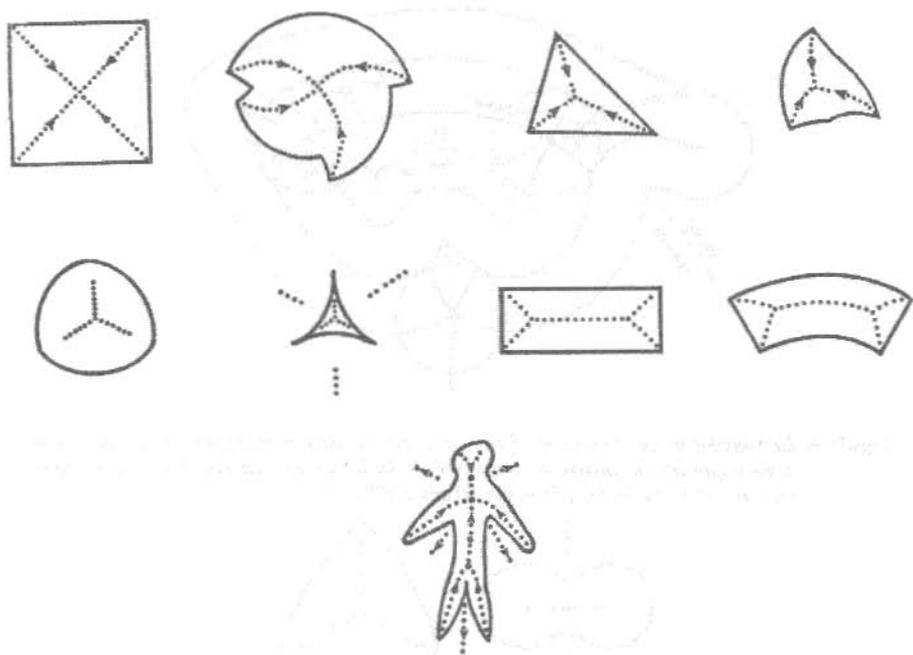


Figure 8 Quelques exemples de cut locus d'après Blum [1973]. (On remarquera que les CL de figures animales ou anthropomorphes correspondent aux bien connues « stick figures » des graphismes archaïques et enfantins).

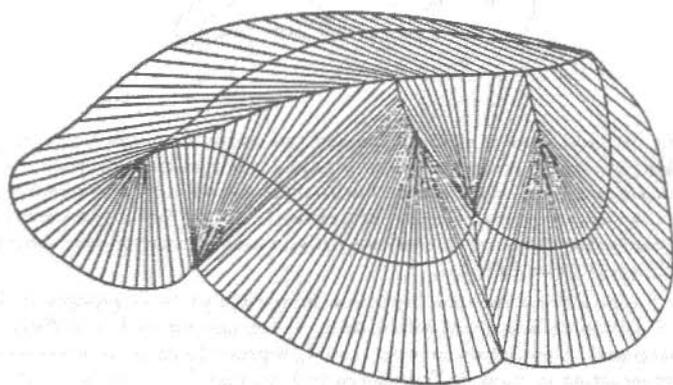


Figure 9 Représentation tridimensionnelle statique du processus de diffusion de contour des Figures 5 et 6. (D'après Blum [1973]).

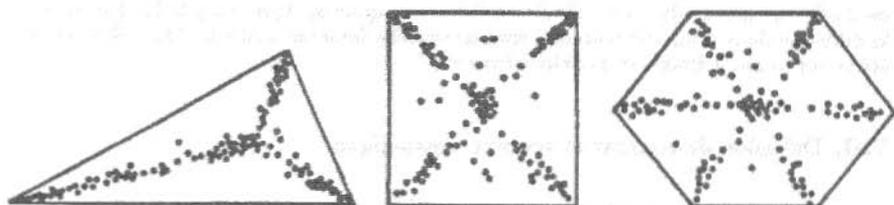


Figure 10 *Confirmation expérimentale de l'hypothèse du cut locus. (D'après Psojka [1978]).*

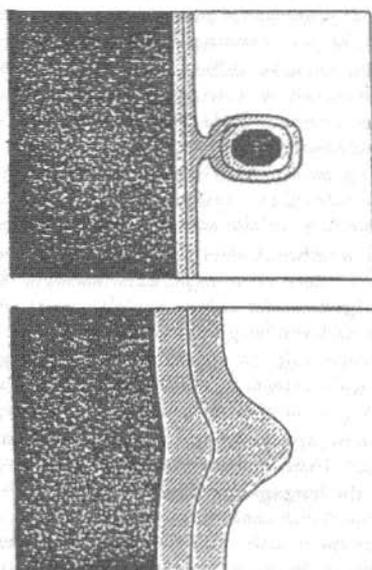


Figure 11 *Une diffusion de contour solution de l'équation de la chaleur, c'est-à-dire obtenue par convolution avec un noyau gaussien. (D'après Kænderink-van Doorn [1986]).*

de réaliser cet objectif est de prendre pour $I_1 = J$ une solution de l'équation de diffusion la plus connue $\Delta J = \partial J / \partial t$ (équation de la chaleur). Cela revient à brouiller I par convolution avec un noyau gaussien $K(r,r') = (1/4\pi) \exp(-|r-r'|^2/4t)$. Les accidents morphologiques d'un tel processus (on suppose que les I_1 sont génériques i.e. que ce sont des fonctions de Morse sauf pour certaines valeurs critiques de t) sont essentiellement des fusions de cols avec des extrema. Il existe une hiérarchie séquentielle de ces accidents. (Cf. Figure 11 ci-dessus.)

L'intérêt de l'approche de Kænderink est de reformuler l'idée directrice de diffusion de contour dans le cadre de ce que l'on sait sur le système visuel, à savoir

qu'il effectue une analyse en série d'ondelettes du signal optique (cf. § II.1). A ce titre, la diffusion de contour est bien une routine visuelle fondamentale. Ce fait a d'ailleurs été reconnu par Ullman et par Grossberg²⁴.

VIII. Diffusion de contour et syntaxe topologique

1. La pertinence cognitive générale de la diffusion de contour

On peut donc faire l'hypothèse que les processus de diffusion de contour possèdent une certaine réalité psychologique. *Notre hypothèse est que, de façon plus générale, ils possèdent également une pertinence cognitive.* En effet, ce sont les seuls processus qui soient des processus locaux de propagation permettant de passer du local au global à partir de conditions initiales définies par scanning de discontinuités qualitatives²⁵.

Evidemment, il pourra sembler difficile d'admettre cette pertinence cognitive générale de la routine de diffusion de contour dans la mesure où celle-ci introduit des entités *virtuelles* (les fronts d'ondes). Mais nous pensons que cette objection n'est pas tenable pour les raisons suivantes.

i) Ce type d'explication au moyen d'entités virtuelles est omniprésente dans les sciences naturelles (de la mécanique symplectique et de l'optique à la mécanique quantique). On peut même dire qu'elle en est l'une des principales caractéristiques.

ii) On sait que de très nombreux effets gestaltiques reposent sur la prégnance de contours virtuels. Or, ces effets sont expérimentalement indéniables. En fait la perception ne peut pas organiser les scènes visuelles sans recourir à des structures virtuelles (cf. les travaux de Grossberg déjà cités).

iii) Si l'on analyse avec soin la façon dont le langage prend en charge la perception, on s'aperçoit qu'il atteste la réalité perceptive d'un nombre considérable de structures virtuelles et que nombre de celles-ci sont de type contour.

En ce qui concerne ce dernier point, nous pensons en particulier aux étonnants travaux de Leonard Talmy. Celui-ci a montré (cf. § I) qu'il existe, encodées dans les structures *grammaticales* du langage, de nombreuses organisations schématiques et gestaltiques *abstraites* (sans doute innées) qui jouent un rôle considérable dans notre structuration conceptuelle du monde. Celles-ci reposent essentiellement sur la fonction de lignes, de surfaces et de mouvements *virtuels* (« fictifs » comme dit Talmy) permettant de faire des énoncés décrivant une scène, non pas de simples descripteurs de contenus perceptifs réels mais des « organizing Gestalts » structurant la scène²⁶.

Il est par conséquent plausible de conférer à la routine de diffusion de contour une pertinence générale. C'est ce que nous allons faire ici pour résoudre notre problème de base.

24. Cf. Ullman [1984]. Pour Grossberg, la détection de contour et la diffusion constituent les deux bases de la modélisation connexionniste du système visuel.

25. Avec ce type de processus, les principes fondamentaux et universels de toutes les sciences naturelles (physiques) — en particulier les principes de *localité* et de *causalité* — s'introduisent (enfin) dans les sciences cognitives et sémio-linguistiques. Comme nous le disions dans notre introduction, cela ouvre ces disciplines à des problèmes totalement inédits dans la mesure où l'objectivité logique n'est plus désormais admise comme première et doit être dérivée d'une objectivité plus profonde.

26. Cf. Talmy [1990].

2. La résolution du problème de base

Soit (A, A_1, A_2) une relation d'association entre les régions A_1 et A_2 . A_1 , A_2 et A sont délimitées par leurs bords respectifs B_1 , B_2 et B (cf. Figure 12).

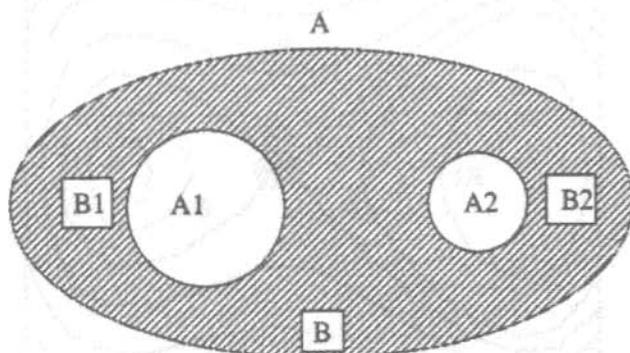


Figure 12 Une relation d'association (A_1, A_2, A) .

L'idée directrice est de passer *continûment* de $B_1 + B_2$ à B par diffusion de contour, autrement dit de considérer une *famille* de contours B^t paramétrée par une variable continue t , variant par exemple dans l'intervalle fermé $I = [0,1]$ et telle que $B^0 = B_1 + B_2$ et $B^1 = B$. Une telle famille s'appelle une *déformation* — et même plus précisément un *cobordisme* — entre $B_1 + B_2$ et B . *Notre thèse est donc que la façon la plus naturelle de transformer une relation d'association en forme est de l'interpréter comme un cobordisme M entre $B_1 + B_2$ et B . Comme B^0 et B^1 ne sont pas de même type topologique il existe nécessairement (au moins) une valeur critique c du paramètre t pour laquelle B^c change de type topologique (cf. Figure 13 page suivante).*

Les contours B^t décrivent un *processus irréversible de différenciation* du domaine indifférencié A en sous-domaines A_1 et A_2 . *C'est cette genèse continue de la relation d'association qui permet de conférer aux relations positionnelles leur unité gestaltique globale et, par conséquent, de les définir morphologiquement.*

Des résultats mathématiques profonds montrent qu'un tel algorithme local et général (nos deux principales contraintes) conduit bien à des conditions nécessaires et suffisantes *locales* pour la détection des relations positionnelles globales.

La façon la plus classique et la plus naturelle d'interpréter les B^t est d'en faire, comme le faisait Harry Blum, des lignes de niveau $f_D = \text{constante}$ d'une *fonction potentiel* f_D définie sur le sous-ensemble $D = A - A_1 \cup A_2$ (le complémentaire de A_1 et A_2 dans A) de M . On a alors $B^t = \{x \mid f_D(x) = t\}$. Si l'on prolonge la diffusion de contour à l'extérieur de A et à l'intérieur de $A_1 \cup A_2$, on obtient un potentiel f — dit *potentiel générateur* de la relation $A_1 - A_2$ — qui est défini sur tout M (cf. Figure 14).

Mathématiquement parlant, nous avons considéré un cobordisme entre $B_1 + B_2$ et B et nous l'avons exprimé au moyen de ce que l'on appelle une *fonction de Morse* ²⁷.

27. Pour quelques précisions élémentaires sur le concept mathématique fondamental de cobordisme (travaux de R. Thom et S. Smale), cf. Petitot [1979b], [1989i] et, surtout, leurs bibliographies.

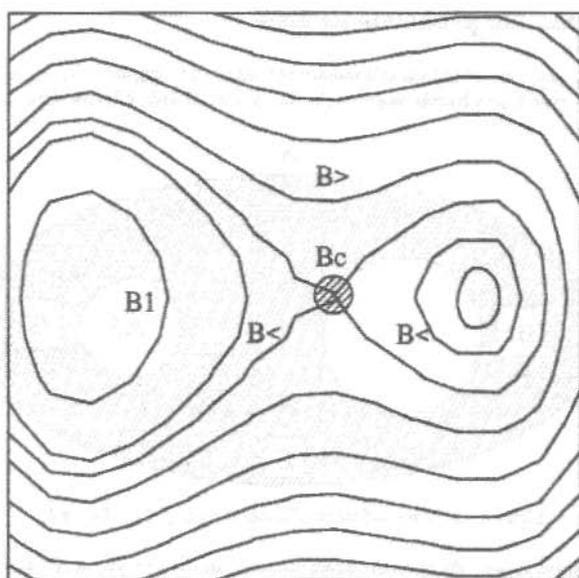


Figure 13 La diffusion de contour $B_1 + B_2 \rightarrow B$. Comme $B_1 + B_2$ (2 composantes connexes) et B (1 composante connexe) ne sont pas de même type topologique, il existe nécessairement un contour critique B^c effectuant la transition. Ce contour comporte un point critique de type col (dans le cercle hachuré). Les contours $B <$ ($t \in [0, c[$) sont de même type topologique que $B_1 + B_2$. Les contours $B >$ ($t \in]c, 1]$) sont de même type topologique que B .

Ceci dit, quelle est la condition nécessaire et suffisante de nature locale qui est caractéristique de la relation d'association ? Nous avons vu que, comme $B_1 + B_2$ et B ne sont pas de même type topologique, il doit exister une ligne de niveau intermédiaire qui réalise la transition entre ces deux types et que cette ligne de niveau présente un point critique — une *singularité* — de type col. Or en théorie de Morse on démontre le théorème suivant :

Théorème. (A_1, A_2, A) est une relation d'association si et seulement si la diffusion de contour $A_1 + A_2 \rightarrow A$ présente un unique point critique qui est de type col.

Mais les singularités de type col (auto-croisement d'une ligne de niveau) sont des entités locales finiment caractérisables. Leur détection est effectuable de façon locale par un automate fini. Nous avons donc résolu notre problème de base : trouver un algorithme dynamique, local et universel permettant de définir des conditions nécessaires et suffisantes, locales et informationnellement finies, pour l'identification des relations positionnelles.

Il est facile de généraliser cette construction à une configuration quelconque de proto-actants positionnels A_i . Les potentiels générateurs sont des compositions de puits de potentiel simples associés aux A_i et c'est cette composition même qui permet de profiler les relations entre les A_i .

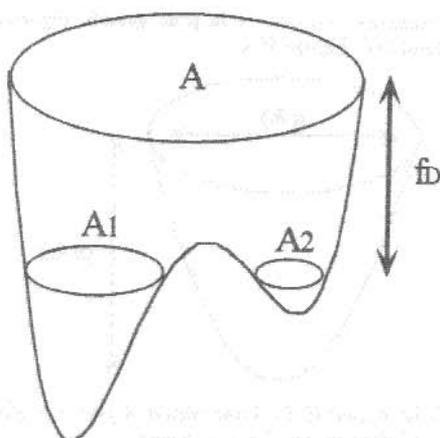


Figure 14 *Le potentiel générateur f d'une relation d'association et sa restriction f_D au domaine $A = A_1 \cup A_2$. Comme chez Blum (cf. Figure 9), les lignes de niveaux de f sont identifiables aux fronts d'ondes de la diffusion de contour.*

3. Lien avec le programme de Terry Regier et George Lakoff

Nous pensons que jusqu'à présent personne n'avait songé à utiliser la routine de diffusion de contour en GC. Mais, en préparant cet article, nous avons pris connaissance d'un intéressant travail de Terry Regier : « Recognizing Image-Schemas Using Programmable Network »²⁸. Regier utilise la diffusion de contour (« bounded spreading activation ») comme « the center of the recognition process » et donne une condition nécessaire et suffisante pour l'usage de prépositions positionnelles comme « dans », « sur », etc. : « The basic idea is that activation spreads out from the copies of object A that were placed in the working image nets, and stops when it encounters units that correspond to the borders of the object in the B-net ». Dans son article « A Suggestion for a Linguistics with Connectionist Foundations », George Lakoff formule la « Conjecture de Regier » comme l'affirmation que « Ullman-style visual routines (...) are sufficient to characterize all known structures in cognitive topology »²⁹.

Nous pensons avoir démontré cette conjecture pour les archétypes syntaxiques d'interaction entre actants.

IX. Syntaxe topologique et morphodynamique

1. L'exemple de l'archétype de capture

Revenons à la relation d'association entre les régions A_1 et A_2 . Il est clair que la taille respective de ces régions — i.e. leurs relations de dominance — peut être codée

28. Regier [1988].

29. Lakoff [1988]. Cette thèse radicalise celle de l'ancrage perceptif des structures sémiolinguistiques et conceptuelles (cf. § I).

par la profondeur des minima associés : à la plus grande région se trouve associé le minimum le plus profond (cf. Figure 15).

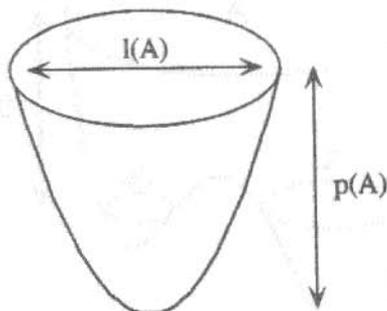


Figure 15 Le codage de la largeur $l(A)$ d'une région A par la profondeur $p(A)$ du puits du potentiel générateur qui lui est associé.

On peut donc schématiser les relations positionnelles entre proto-actants par les rapports de domination entre les minima des potentiels générateurs associés (cf. Figure 16).

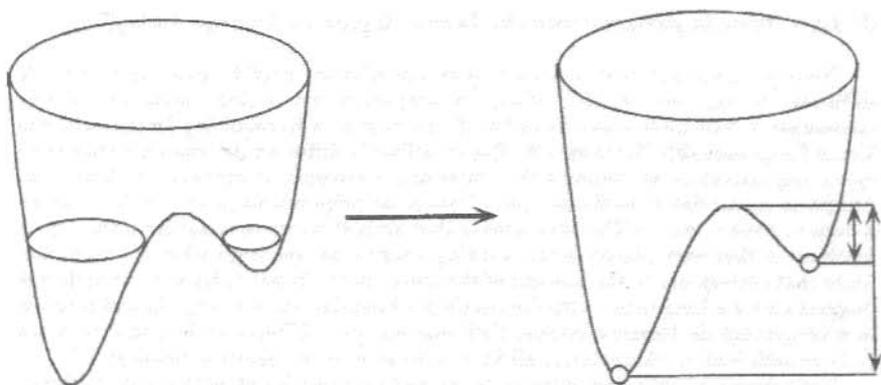


Figure 16 Le codage des relations entre régions par les rapports de domination entre les minima corrélatifs.

On peut même en général réduire la dimension de l'espace M sur lequel est défini le potentiel générateur f à une valeur minimale. Techniquement parlant, il s'agit du concept de *codimension* d'une singularité. Dans l'exemple de la relation d'association que nous avons traité ici, la codimension de la bifurcation est égale à 1 et on peut donc se ramener à des potentiels définis sur un espace de dimension 1 (cf. Figure 17).

Ainsi, à travers la routine de diffusion de contour, les schématisations de la GC deviennent équivalentes aux schématisations morphodynamiques utilisant des potentiels générateurs. Dans ces schématisations :

(i) les actants du processus sont identifiés aux minima du potentiel générateur — i.e. avec les attracteurs que celui-ci détermine —, et

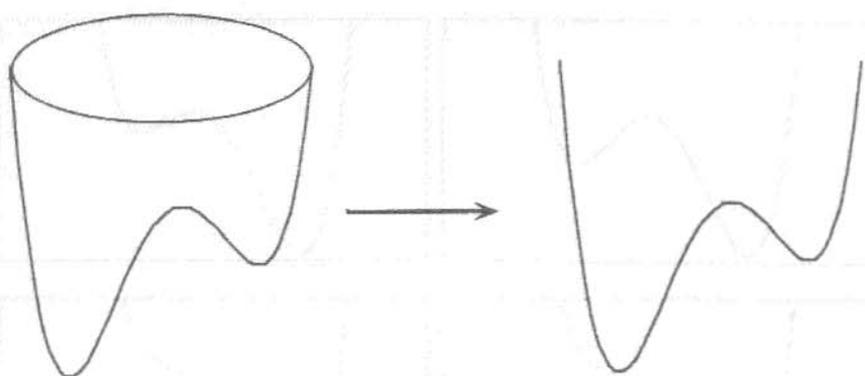


Figure 17 Réduction de la dimension de l'espace sur lequel est défini un potentiel générateur.

(ii) le verbe lexicalisant le processus est identifié à l'évènement de bifurcation qui change le type topologique du potentiel, c'est-à-dire à une interaction des actants.

Alors que dans une description symbolique, les actants sont représentés par des symboles (supposés dénoter des entités) et les relations actantielles par des relations formelles entre ces symboles, dans une schématisation morphodynamique les actants sont représentés par des entités mathématiques (des minima de potentiels générateurs) pour lesquelles on sait définir le concept « physique » (non purement formel) d'interaction. Nous rencontrons là l'un des aspects les plus importants du passage d'une « Logique du Sens » à une « Physique du Sens ».

Les schèmes de processus de la GC peuvent donc être interprétés comme des déformations temporelles f_t de potentiels générateurs, c'est-à-dire comme des chemins temporels dans l'espace fonctionnel \mathcal{F} (de dimension infinie) des potentiels. Par exemple, pour l'archétype [ENTRER], la transformation de la situation initiale $[A_1 \text{ ASSOC } A_2]$ en la situation finale $[A_1 \text{ IN } A_2]$ correspond à la déformation continue f_t d'un potentiel générateur possédant deux minima, déformation traversant une bifurcation (la capture de A_1 par A_2) pour une valeur critique de t (cf. Figures 18, 19, 20 pages 120, 121, 122)³⁰.

2. Les quatre modes de représentation de l'information positionnelle

On voit ainsi, par exemple pour l'archétype [ENTRER], qu'il y a équivalence entre quatre modes de représentation de l'information positionnelle.

- (i) Le profilage du verbe [ENTRER] au sens de la GC.
- (ii) Le processus de diffusion de contour et sa déformation temporelle.
- (iii) Le chemin temporel paramétrant la déformation du potentiel générateur f_t et engendrant le graphe actantiel transformant la disjonction $A_1 \cup A_2$ en la conjonction $A_1 \cap A_2$.
- (iv) L'archétype cognitif [ENTRER].

30. Pour ces figures, je remercie J. M. Salanskis et Y. Gueniffey de leur assistance technique.

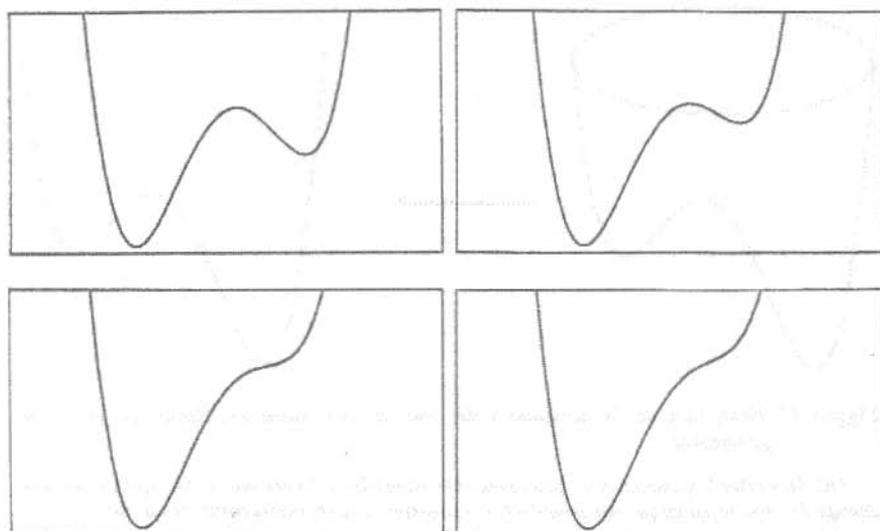


Figure 18 Schématisation morphodynamique de l'archétype [ENTRER].

1. La déformation temporelle du potentiel générateur (unidimensionnel) f_1 . On notera l'événement de bifurcation du minima correspondant à A_2 (« capture » de A_2 par A_1). On remarquera également que cette déformation schématise exactement l'archétype cognitif de la Figure 1.

Mais ces quatre représentations, bien qu'équivalentes, n'appartiennent pas au même mode de représentation.

(i) Le profilage fournit une représentation schématique (figurative) intermédiaire qui n'est ni directement dérivée des mécanismes cognitifs élémentaires et fondamentaux (scanning, propagation), ni directement insérable en tant que telle dans des calculs prédictifs symboliques.

(ii) La déformation du processus de diffusion de contour fournit une représentation dynamique à contenu psychophysique qui est fondée dans des mécanismes cognitifs élémentaires et fondamentaux (scanning, propagation) et qui est compatible avec l'ancrage perceptif du langage naturel.

(iii) La déformation du potentiel générateur et le graphe actantiel associé fournissent une représentation morphodynamique qui insère la diffusion de contours dans les théories mathématiques de la dynamique qualitative et, en particulier, dans la théorie des systèmes dynamiques, de leurs attracteurs et de leurs bifurcations.

(iv) Enfin, l'archétype cognitif fournit une représentation symbolique directement insérable dans des calculs prédictifs formels.

X. Sur certains avantages de l'approche morphodynamique

Le fait que les schèmes figuratifs de la GC soient équivalents aux schèmes mathématiques de l'approche morphodynamique implique certains avantages. Nous voudrions en citer trois pour conclure.

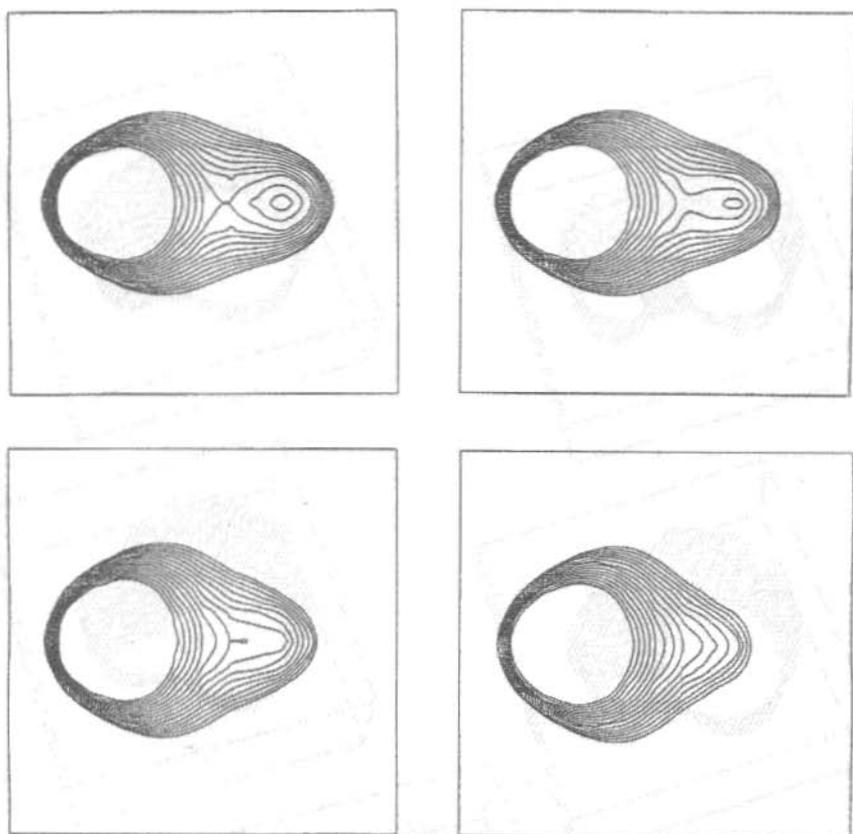


Figure 19 Schématisation morphodynamique de l'archétype [ENTRER].

2. La déformation temporelle du processus de diffusion de contour (bidimensionnel) de la relation d'association $[A_1 \text{ ASSOC } A_2]$. Elle fait passer de la situation initiale $[A_1 \text{ ASSOC } A_2]$ à la situation finale $[A_2 \text{ IN } A_1]$. Elle permet le profilage d'un processus de déformation temporelle de relations elles-mêmes profilées.

1. Le transfert de modèles

Nous pouvons directement transférer à la GC les nombreux travaux utilisant déjà l'approche morphodynamique. Parmi ceux-ci, nous nous permettrons de citer en particulier :

(i) Les travaux de René Thom sur la syntaxe topologique. Il est incontestable que René Thom est l'inventeur des idées maîtresses de la syntaxe topologique et qu'il a anticipé de plus de quinze ans sur « l'avant-garde » de la GC. Son droit de priorité est irrécusable.

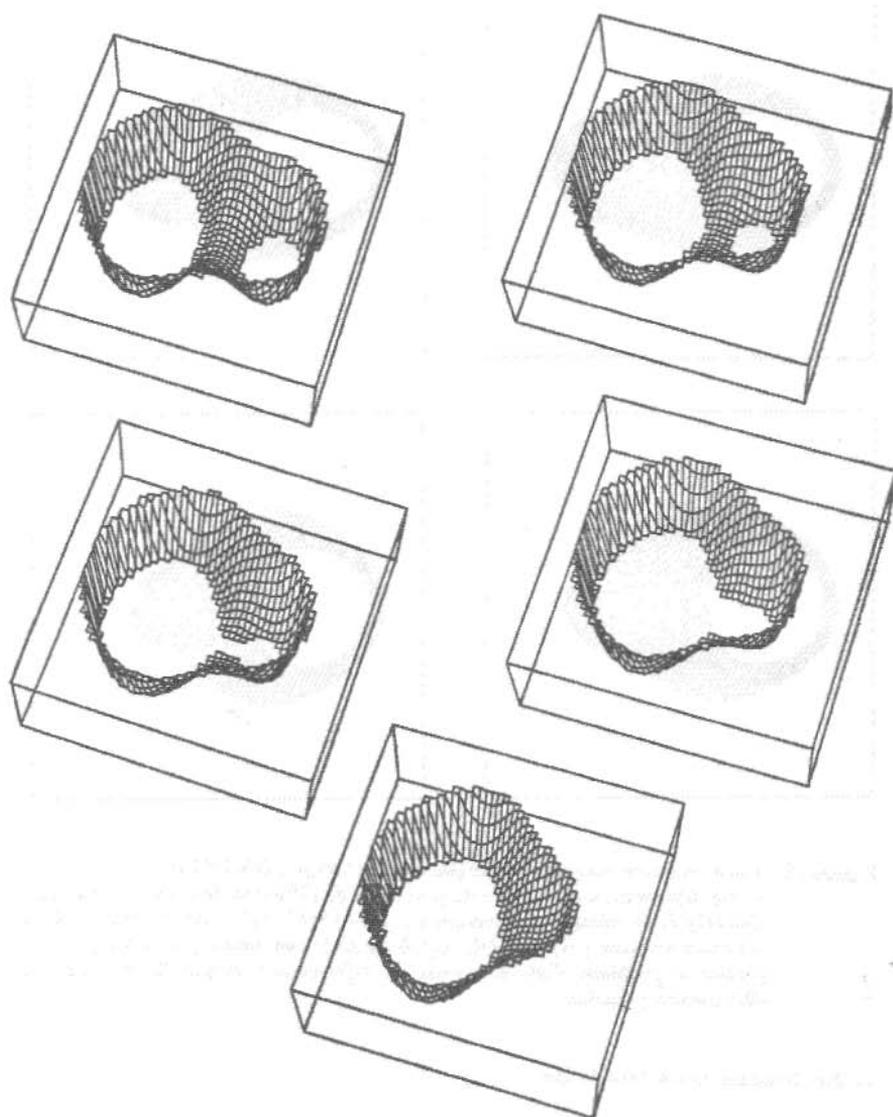


Figure 20 Schématisation morphodynamique de l'archétype [ENTRER].
 3. La déformation temporelle du potentiel générateur (bidimensionnel) f . On remarquera que cette déformation schématise exactement la description de la GC donnée à la Figure 4.

(ii) Les travaux de Wolfgang Wildgen sur l'application des modèles morphodynamiques à nombre de problèmes linguistiques classiques.

(iii) Nos propres travaux sur l'application de ces modèles :

- aux grammaires casuelles (Chafe, Fillmore, Potts, Willems),
- aux grammaires relationnelles (Keenan, Comrie, Johnson, Postal),
- à l'hypothèse localiste (Hjelmslev, Anderson, etc.),
- à la syntaxe actantielle (Tesnière, Greimas, etc.),
- à la grammaire cognitive (Jackendoff, Talmy, Langacker).

2. La solution du problème de la constituance dans les modèles linguistiques connexionnistes

Transférée à la GC, l'approche morphodynamique peut apporter beaucoup au programme de recherche d'une linguistique connexionniste.

Remarquons d'abord qu'il est en principe très facile de faire le lien avec des modèles connexionnistes (CX) puisque ceux-ci sont essentiellement des implémentations de modèles morphodynamiques dans des réseaux de neurones formels³¹. Cela permet d'utiliser le concept de *syntaxe d'attracteurs* explicité plus haut pour répondre aux critiques sévères adressées à Paul Smolensky par Jerry Fodor et Zenon Pylyshyn³².

Fodor et Pylyshyn ont montré que la principale faiblesse du CX était de ne pas offrir une bonne théorie de la syntaxe et de la constituance³³. Dans le point de vue CX (qui est affine, nous l'avons vu, à celui de la GC), on décrit les *contenus sémantiques* des représentations au moyen d'*attracteurs* de dynamiques implémentées dans des réseaux de neurones formels. Comment développer alors une théorie plausible de la syntaxe ? La première idée a été de modéliser un énoncé composé au moyen de la superposition des attracteurs modélisant ses constituants. Elle est clairement absurde puisqu'elle prétend représenter des structures syntaxiques non commutatives et non associatives au moyen d'une opération (la superposition) associative et commutative. Une autre idée, proposée par Paul Smolensky et faisant usage de l'opération algébrique de produit tensoriel, consiste à se donner des structures *symboliques* composées d'actants porteurs de rôles sémantiques (conception casuelle de la syntaxe) et à chercher une *représentation* (un peu au sens où l'on parle de représentations de groupes dans des espaces vectoriels) de ces structures symboliques dans des modèles CX. Malgré son intérêt intrinsèque, cette solution n'est pas satisfaisante car elle abandonne l'idée d'une *théorie proprement dynamique* de la constituance et des structures syntaxiques.

Pour accéder à une authentique constituance dans les modèles CX, nous devons en fait modéliser la *différence de catégorie grammaticale* existant entre les substantifs et les verbes. Si les actants d'un processus sont modélisés par des attracteurs de systèmes dynamiques, les verbes *ne peuvent pas* être modélisés de la même façon (ce serait une erreur de catégorie). Les verbes doivent être modélisés par l'*interaction* des actants. Mais, mathématiquement, une telle interaction correspond à une bifurcation d'attracteurs (cf. plus haut, § IX.1).

31. Toutefois, l'implémentation pose de délicats problèmes techniques. Cf. Visetti [1990].

32. Cf. Smolensky [1988], Fodor-Pylyshyn [1988] et Fodor-McLaughlin [1990].

33. Pour une analyse détaillée des arguments de Fodor et Pylyshyn, cf. Petitot [1989g]. Pour le challenge que constituent ces critiques pour le CX, cf. Visetti [1990].

3. Dynamiques externes et contrôle modal

Enfin, nous voudrions mentionner les liens existant entre la syntaxe actantielle morphodynamique et le concept de *Force Dynamics* développé par Leonard Talmy³⁴.

L'idée directrice de la *Force Dynamics* est que les auxiliaires modaux des langues naturelles (« pouvoir », « vouloir », « devoir ») ainsi que des quasi-auxiliaires comme « laisser », « aider », « empêcher », « essayer », « continuer à », « s'efforcer de », « réussir à », ou encore des conjonctions comme « à cause de », « grâce à », « malgré », « bien que », « contre », etc. spécifient grammaticalement au moyen de classes fermées (cf. § I) des rapports de forces dynamiques (énergétiques) entre les actants d'un processus et, par conséquent, spécifient grammaticalement les notions de force, d'obstacle, de résistance, de blocage, de dépassement, de coopération, de compétition, etc.

Selon Talmy, la notion de Force est « the semantic category that the modal system as a whole is dedicated to express »³⁵ et « the semantic category of force dynamics [...] must be recognized as one of preeminent conceptual organizing categories in language »³⁶.

Or, l'un des principaux théorèmes de la théorie des bifurcations dit que les bifurcations dépendent de paramètres naturels variant dans ce qu'on appelle des *déploiements universels* W (espaces externes ou espaces de contrôle)³⁷. Une déformation f_t de potentiels générateurs conduisant d'un état initial f_0 à un état final f_1 s'identifie par conséquent à un *chemin* (temporellement paramétré) dans un certain W . Or ces chemins peuvent être interprétés comme des *trajectoires de certaines dynamiques « externes » dans W* , dynamiques externes *contrôlant* les interactions entre les attracteurs, c'est-à-dire les relations de dominance (l'ago-antagonisme) entre les actants. Comme Per Aage Brandt — qui a été le premier à souligner l'importance des travaux de Leonard Talmy et Eve Sweetser pour les traditions sémio-linguistiques structuralistes — l'a brillamment montré, ces dynamiques externes sont en fait des *dynamiques modales* et sont profondément liées au concept talmyen de *Force Dynamics*³⁸.

Conclusion

Les modèles morphodynamiques — que l'on savait déjà être appropriés à la schématisation des concepts du structuralisme dynamique — apparaissent être également bien appropriés à la schématisation des concepts théoriques de la GC ainsi qu'à la modélisation des phénomènes cognitifs sous-jacents. Jusqu'à ces dernières années, c'est leur fonction schématisante pour les concepts théoriques qui avait été principalement investiguée. Désormais, on peut prolonger et enrichir une telle investigation par une modélisation de processus cognitifs implémentés dans des réseaux neuromimétiques.

Evidemment, une telle approche s'accompagne d'un *changement de niveau* des problèmes considérés comme pertinents et prioritaires. Il ne s'agit plus à proprement

34. Cf. Talmy [1985]. Pour des détails, cf. Petitot [1989h].

35. Talmy [1985], p. 1.

36. Ibid. p. 41.

37. Pour des précisions et des renseignements bibliographiques, cf. par exemple Thom [1972], Chenciner [1973], [1980], [1985] et Petitot [1979b], [1982], [1986a].

38. Cf. Brandt [1986].

parler de problèmes de linguistique, mais plutôt de problèmes *proto-linguistiques*³⁹. L'analyse mathématique de ceux-ci a d'ores et déjà conduit à la *naturalisation* des conditions de possibilité du sens et de la grammaire. On peut penser qu'une telle naturalisation ne pourra que conduire à l'intégration de l'objectivité sémiolinguistique dans l'objectivité élargie des sciences naturelles. C'est en ce sens que « les sciences humaines seront des sciences naturelles ou ne seront pas ».

BIBLIOGRAPHIE

- AMIT D., 1950. *Modeling Brain Function*, Cambridge University Press.
- ANDERSON J. M., 1971. *The Grammar of Case, Towards a Localistic Theory*, Cambridge University Press.
- ANDERSON J. M., 1975. « La grammaire casuelle », suivi de « Maximi Planudis in Memoriam », *Langages*, 18-64 et 81-103, Paris, Didier-Larousse.
- BALLARD D. H., BROWN C. M., 1982. *Computer Vision*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- BLUM H., 1973. « Biological Shape and Visual Science », *Journal of Theoretical Biology*, 38, 205-287.
- BRADY M., 1982. « Computational Approaches to Image Understanding », *Computing Surveys*, 14, 1, 3-71.
- BRANDT P.-A., 1986. *La Charpente modale du Sens*, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris III.
- BUSER P., IMBERT M., 1987. *Vision*, Paris, Hermann.
- CHENCINER A., 1973. « Travaux de Thom et Mather sur la stabilité topologique », *Séminaire Bourbaki*, n° 424.
- CHENCINER A., 1980. « Singularités des fonctions différentiables », *Encyclopaedia Universalis*.
- CHENCINER A., 1985. « Systèmes dynamiques différentiables », *Encyclopaedia Universalis*.
- DESCLES J.-P., 1986. « Représentation des connaissances. Archétypes cognitifs, Schèmes conceptuels, Schémas grammaticaux », *Actes Sémiotiques*, VII, 69/70.
- DESCLES J.-P., 1990. *Langages applicatifs, langues naturelles et cognition*, Paris, Hermès.
- FODOR J., PYLYSHYN Z., 1988. « Connectionism and Cognitive architecture: A critical analysis », *Cognition*, 28, 1/2, 3-71.
- FODOR J., McLAUGHLIN B. P., 1990. « Connectionism and the problem of systematicity: Why Smolensky's solution doesn't work », *Cognition*, 35, 183-204.
- GOETHE J. W. von, 1780-1830. *La Métamorphose des Plantes* (trad. H. Bideau), Paris, Triades, 1975.
- GREIMAS A. J., COURTES J. (eds.), 1986. *Sémiotique, Dictionnaire raisonné de la Théorie du Langage, II*, Paris, Hachette.
- HAIMAN J. (ed.), 1985. *Iconicity in Syntax*, Amsterdam, J. Benjamins.

39. Si l'on nous permet de reprendre une analogie que nous trouvons fort parlante (cf. notre introduction), il s'agit de passer d'une « biochimie » macromoléculaire d'assemblages complexes à la « physique » atomique sous-jacente.

- HJELMSLEV L., 1935. *La catégorie des cas*, München, Wilhelm Fink Verlag, [1972].
- JACKENDOFF R., 1983. *Semantics and Cognition*, Cambridge, MIT Press.
- JACKENDOFF R., 1987. *Consciousness and the Computational Mind*, Cambridge, MIT Press.
- KOENDERINK J. J., 1984. « The Structure of Images », *Biological Cybernetics*, 50, 363-370.
- KOENDERINK J. J., VAN DOORN A. J., 1986. « Dynamic Shape », *Biological Cybernetics*, 53, 383-396.
- KOENDERINK J. J., VAN DOORN A. J., 1987. « Representation of Local Geometry in the Visual System », *Biological Cybernetics*, 55, 367-375.
- LAKOFF G., 1988. « A Suggestion for a Linguistics with Connectionist Foundations », *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*, M. Kaufman.
- LANGACKER R., 1987. *Foundations of Cognitive Grammar*, Stanford University Press.
- MALLAT S. G., ZHONG S., 1989. « Complete Signal Representation with Multiscale Edges », *Technical Report n° 483*, Department of Computer Sciences, New York University.
- MARR D., 1982. *Vision*, San Francisco, Freeman.
- MEYER Y., 1988. *Ondelettes et Opérateurs*, Paris, Hermann.
- MEYER Y., 1989. « Ondelettes, filtres miroirs en quadrature et traitement numérique de l'image », *Gazette des Mathématiciens*, 40, 31-42.
- OUELLET P., 1987. « Une Physique du Sens », *Critique*, 481/482, 577-597.
- PETITOT J., 1979a. « Hypothèse localiste et Théorie des Catastrophes », *Théories du Langage, Théories de l'Apprentissage*, (M. Piatelli ed.), Paris, Le Seuil.
- PETITOT J., 1979b. « Locale/Globale », *Enciclopedia Einaudi*, VIII, 429-490, Turin, Einaudi.
- PETITOT J., 1982. *Pour un Schématisme de la Structure*. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- PETITOT J., 1983. « Théorie des catastrophes et Structures sémio-narratives », *Actes Sémiotiques*, V, 47/48, 5-37.
- PETITOT J., 1985a. *Morphogenèse du Sens*, Paris, Presses Universitaires de France.
- PETITOT J., 1985b. *Les Catastrophes de la Parole*, Paris, Maloine.
- PETITOT J., 1986a. Articles « Théorie des catastrophes » dans *Greimas-Courtès 1986*.
- PETITOT J., 1986b. « Thèses pour une objectivité sémiotique », *Sémiologie et Sciences exactes*, *Degrès*, 42/43, g^1-g^{23} .
- PETITOT J., 1986c. « Structure », *Encyclopedic Dictionary of Semiotics* (Th. Sebeok, ed.), Tome 2, 991-1022, New-York, de Gruyter.
- PETITOT J., 1986d. « Le « morphological turn » de la Phénoménologie », *Documents du CAMS*, Paris, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- PETITOT J., 1987. « Sur le réalisme ontologique des universaux sémio-linguistiques », *Sémiotique en jeu* (M. Arrivé J. C. Coquet eds.), Paris-Amsterdam, Hadès-Benjamins, 43-63.
- PETITOT J., 1988. « Approche morphodynamique de la formule canonique du mythe », *L'Homme*, 106-107, XXVIII (2-3), 24-50.
- PETITOT J., 1989a. « Eléments de dynamique modale », *Poetica et Analytica*, 6, 44-79, Université d'Aarhus.
- PETITOT J., 1989b. « On the Linguistic Import of Catastrophe Theory », *Semiotica*, 74, 3/4, 179-209.
- PETITOT J., 1989c. « Morphodynamics and the Categorical Perception of Phonological Units », *Theoretical Linguistics*, 15, 1/2, 25-71.
- PETITOT J., 1989d. « Hypothèse localiste, Modèles morphodynamiques et Théories cognitives : Remarques sur une note de 1975 », *Semiotica*, 77, 1/3, 65-119.

- PETITOT J., 1989e. « Forme », *Encyclopaedia Universalis*, XI, 712-728, Paris.
- PETITOT J., 1989f. « La modélisation : formalisation ou mathématisation ? L'exemple de l'approche morphodynamique du langage », *Perspectives méthodologiques et épistémologiques dans les sciences du langage* (M. J. Reichler-Bégulin ed.), 205-220, Bern, Peter Lang.
- PETITOT J., 1989g. « Why Connectionism is such a Good Thing. A Criticism of Fodor's and Pylyshyn's Criticism of Smolensky », *Rapports du CREA n° 9020B*, Paris, Ecole Polytechnique.
- PETITOT J., 1989h. « Modèles morphodynamiques pour la Grammaire cognitive et la Sémiotique modale », *RSSJ* (Canadian Semiotic Association), 9, 1-2-3, 17-51.
- PETITOT J., 1989i. « Syntaxe et Topologie : l'Hypothèse localiste de René Thom à Ronald Langacker », *Colloque Linguistique, Sémantique et Cognition* (Responsable J. P. Desclés), Université de Paris-Sorbonne.
- PETITOT J., 1990a. « Le Physique, le Morphologique, le Symbolique. Remarques sur la Vision », *Revue de Synthèse*, 1-2, 139-183.
- PETITOT J., 1990b. « Semiotics and Cognitive Science : the Morphological Turn », *The Semiotic Review of Books*, 1, 1, 2-4.
- PETITOT J., 1990c. « Le Morphologique entre le Physique et le Symbolique », *Colloque de Cerisy, La Philosophie, les Sciences Humaines et l'étude de la Cognition*.
- PETITOT J., 1990d. « Modèles dynamiques des phénomènes de perception catégorielle », *Séminaire Architecture des connaissances* (Responsable D. Dubois), Paris, Ecole Pratique des Hautes Etudes, III^e Section.
- PETITOT J., 1990e. « Que signifie « catégoriser un espace ? » », *Journée Scientifique de l'ARC, Continu et Discret dans les Sciences de la Cognition*.
- PETITOT J., (A). *Physique du Sens* (à paraître aux éditions du CNRS).
- PINKER S., 1984. « Visual Cognition : An Introduction », *Cognition*, 18, 1-63.
- PSOTKA J., 1978. « Perceptual Process that May Create Stick Figures and Balance », *Journal of Experimental Psychology*, (Human Perception and Performance), 4, (1), 101-111.
- REGIER T., 1988. « Recognizing Image-Schemas Using Programmable Networks », *Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School*, M. Kaufman.
- RS, 1990. *Sciences cognitives : quelques aspects problématiques* (J. Petitot ed.), *Revue de Synthèse*, IV, 1-2.
- SCHWARTZ J. L., 1987. *Représentations auditives de spectres vocaliques*, Thèse, Grenoble, Institut National Polytechnique.
- SMOLENSKY P., 1988. « On the Proper Treatment of Connectionism », *The Behavioral and Brain Sciences*, 11, 1-23.
- STILLINGS N. A. et al., 1987. *Cognitive Science. An Introduction*, Cambridge, MIT Press.
- SWEETSER E. E., 1982. « Root and Epistemic Modals : Causality in Two Worlds », *Berkeley Linguistic Society*, 8.
- TALMY L., 1978. « Relation of Grammar to Cognition », *Proceedings of TINLAP-2* (D. Waltz ed.), Urbana, University of Illinois.
- TALMY L., 1983. « How Language Structures Space », *Spatial Orientation : Theory, Research and Application*, (H. Pick, L. Acredolo, eds.), Plenum Press.
- TALMY L., 1985. « Force Dynamics in Language and Thought », *Parasession on Causatives and Agentivity*, Chicago Linguistic Society (21st Regional Meeting).
- TALMY R., 1990. « Fictive Motion in Language and Perception », *Workshop Motivation in Language*, International Center for Semiotic and Cognitive Studies, Université de San Marino.

- THOM R., 1972. *Stabilité structurelle et Morphogénèse*, New York, Benjamin, Paris, Ediscience.
- THOM R., 1980. *Modèles mathématiques de la Morphogénèse* (2^e éd.), Paris, Christian Bourgeois.
- THOM R., 1988. *Esquisse d'une Sémiophysique*, Paris, InterEditions.
- ULLMAN S., 1984. « Visual routines », *Cognition*, 18, 97-159.
- VISETTI Y. M., 1990. « Modèles connexionnistes et représentations structurées », *Modèles Connexionnistes* (D. Memmi, Y. M. Visetti eds.), *Intellectica*, 9-10, 167-212.
- WILDGEN W., 1982. *Catastrophe Theoretic Semantics*, Amsterdam, Benjamin.