

Présence de René Thom

Benoît Virole

2019 - 2022

Résumé

Une version très allégée de ce texte constitue un des chapitres de l'ouvrage *Catastrophes de l'inconscient*, édition Baghera, 2019. Il est ici complété par la formulation mathématique minimale de la théorie des catastrophes reprise sous une forme modifiée de la présentation de Jean Petitot au séminaire *L'identité* de Claude Lévi-Strauss, en 1977. La théorie des catastrophes est présentée dans ses grandes lignes avec les principales extensions en biologie théorique et en linguistique. Ce texte est avant tout un hommage à René Thom dont l'œuvre, d'une importance considérable, est trop injustement aujourd'hui négligée et qui n'a pas craint de développer sa propre pensée à contre courant des modes.

Mots-clefs

Psychanalyse Théorie des catastrophes Sciences de la complexité

À chacun son poêle

Il fut un temps où un homme seul devant son poêle parvenait à mettre à bas les philosophies anciennes avec quelques règles de géométrie et à donner un nouveau sens au monde. Le temps de Descartes est révolu. La complexité du monde échappe aux prétentions de l'entendement. Nous attendons de la science une représentation intelligible du monde qu'elle ne parvient plus à nous donner. Face à elle, nous nous tenons comme face à une divinité dont nous ne comprenons pas les desseins. Cette divinité possède des bras multiples. Chacun représente une discipline, physique, biologie, mathématique (...), et si l'on se penche sur chacun d'entre eux, on le voit se démultiplier en de nouveaux appendices. Dans les sciences humaines, la ramification des spécialités est une arborescence dont la prolifération semble n'avoir aucune limite. Avoir une vue d'ensemble des apports scientifiques est devenu un non sens. Alors, faute de pouvoir saisir la complexité par l'esprit, nous confions nos destinées à des algorithmes d'analyse statistique, à ce *big data*, ce monstre des données numériques mondialisées offertes aux réseaux de neurones formels et aux algorithmes, merveilles de l'intelligence, dont nous sommes admiratifs mais dont nous craignons

qu'elles ne soient déployées au service d'une défaite de la pensée. Rares sont les esprits qui sont insurgés contre la défaite de la pensée. René Thom est l'un d'entre eux. Son éthique était celle du devoir de tout homme de se forger, par lui-même, pour lui-même, sans autre enjeu que l'exigence d'aller jusqu'au bout de sa pensée, une intelligibilité du réel.

Lire René Thom

Profonde, multiforme, déroutante, la lecture de l'œuvre de René Thom rebute souvent le lecteur non seulement par son expression formelle (symboles mathématiques, équations) mais également par son style. En lisant ses livres, on a le sentiment d'une écriture théorique de première intention, en ce sens que sa présentation livresque semble identique à son élaboration¹. Thom pense en même temps qu'il écrit. Il développe ses modèles, comme pour lui-même, avec un souci assez léger de la compréhension du lecteur non mathématicien. Il construit sa propre intelligibilité d'un phénomène, avec la concision de l'écriture mathématique. Thom se place devant les faits et procède de première main, en développant ses in-

1. Thom, paraît-il, affirmait ne jamais corriger ses écrits.

tutions personnelles au lieu de se rabattre, comme l'écrit Jean Largeault, sur le commentaire de texte ou la glose à la façon anglo-saxonne².

Lire Thom, est donc difficile. Son style d'écriture, de type tableau noir de mathématicien, a été un obstacle à la diffusion de sa pensée, et ceci malgré les ouvrages d'entretiens destinés à la rendre plus accessible. Pourtant, l'essence mathématique de la théorie des catastrophes peut être abordée à partir du niveau d'un baccalauréat scientifique (fonctions, singularités, dérivées). Elle se prolonge ensuite à un niveau beaucoup plus élevé qui nécessite des connaissances, en particulier en topologie, hors de portée pour le non mathématicien. Cependant, la plupart des articles de René Thom restent intelligibles par un contexte formulé en langue usuelle en parallèle de son énonciation mathématique. L'intuition métaphorique de la théorie des catastrophes, autrement dit l'inspiration fournie par ses concepts, est tout aussi légitime que ses modélisations mathématiques. Lire Thom, c'est accueillir en soi l'imagination intuitive offrant de nouveaux horizons de pensée, souvent vertigineux.

La voie de chemin de fer

Né à Montbéliard en 1923, René Thom, enfant longtemps ravi par le spectacle des aiguillages des trains³, devint élève de l'École Normale Supérieure et soutint une thèse de mathématique en 1951 portant sur les principes du cobordisme, ce qui lui valut en 1958 d'obtenir la médaille Fields. Le cobordisme est une manière de penser la conjonction de deux objets hétérogènes. Deux objets mathématiques, à savoir des variétés différentiables de dimension n , sont dites *cobordants*, si réunis, ils forment le bord d'une variété de dimension supérieure ($n + 1$) et ceci de façon absolue, c'est-à-dire indépendamment de leur prolongement. Autrement-dit, l'origine de la théorie des catastrophes est celle d'une réflexion sur la possibilité de réunion d'objets hétérogènes en un objet homogène à la condition que celui-ci existe

dans un espace d'une dimension supérieure⁴. Sur le plan mathématique, la théorie des catastrophes est une théorie des singularités de certaines équations différentielles. Ces singularités, points d'inflexion des courbes continues, possèdent des propriétés remarquables : inflexion, infinitude, indétermination à leur voisinage, dégénérescence, instabilité. Ces singularités possèdent une longue histoire philosophique puisque Leibniz considérait déjà les valeurs critiques des fonctions comme des lieux de passage de l'essence à l'existence :

« Sur des fonctions numériques simples, il (Leibniz) observait que l'image inverse d'une valeur régulière, au voisinage d'une valeur singulière, compte parfois plusieurs points, et Dieu qui préfère les moyens uniques, choisit les *extrema*. »⁵.

Le notion de singularité s'inscrit dans l'histoire des théories des bifurcations, ouvertes par les travaux de Poincaré et poursuivies par les mathématiciens Andronov, Pontryagine, Morse et Whitney. Ces travaux visaient à connaître la distribution topologique des solutions des équations décrivant des systèmes dynamiques, en cherchant à localiser les singularités des courbes (*maxima* et *minima*), ces points où la dérivée des fonctions s'annule et où la courbe change de sens. Hassler Whitney a travaillé sur la projection des singularités d'une surface sur une autre et a étudié leurs déformations. Par exemple, lorsqu'on projette les contours d'un volume sur une surface, on obtient des plis qui sont l'image du volume initial et donc intègrent dans cette projection toutes les informations sur ce volume. Ces points critiques reflètent les accidents topologiques des surfaces sur lesquelles ils sont projetés. Thom a montré que ces singularités topologiques se déploient dans des variations limitées. Elles constituent ainsi une *structure* par une disposition réciproque des *minima* et *maxima* des courbes.

En 1965, Thom arriva à la conclusion qu'il n'existe que sept déploiements stables de ces singularités et il les nommera *catastrophes élémentaires*. Le choix par Thom du terme de « catastrophe » a été critiqué car il connote la notion négative de destruction

2. Largeault J., « Préface à *Apologie du Logos* », René Thom, Hachette, 1990, p. 10.

3. Thom R., *Songeries ferroviaires*, (1979), *Apologie du Logos*, 1990.

4. Thom R., *Paraboles et catastrophes*, 1980, Flammarion, 1983, p. 22.

5. Cf. Largeault J., Préface à *Apologie du Logos*, René Thom, 1990, p.12.

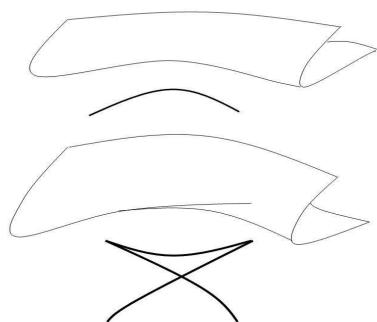


FIGURE 1 – En haut projection d'un pli en trois dimensions sur une surface donnant une ligne comme contour apparent. En bas, l'accentuation du pli génère une queue d'aronde.

irréversible. Thom a toujours défendu ce choix lexical qui est justifié sur le plan étymologique. L'étymologie du mot *catastrophe* est empruntée au latin, *catastropha*, lui-même issu du grec *katastrophê*, signifiant « renversement »⁶. Le mot est apparu chez Rabelais, dès 1546, et prend le sens de dénouement d'une pièce de théâtre. Racine utilise ainsi le mot dans son sens habituel à l'âge classique de dénouement d'une action :

« Aristote bien éloigné de nous demander des Héros parfaits, veut au contraire que les personnages tragiques, c'est-à-dire ceux dont le malheur fait la catastrophe de la Tragédie, ne soient ni tout à fait bons, ni tout à fait méchants. »⁷.

Pour Thom, les catastrophes sont les lieux des valeurs de bifurcation de ces projections, donc des fonctions, et par extension des champs de vecteurs différentiables. Les fonctions (ou ces champs de vecteurs) qui présentent des singularités dégénérées, c'est-à-dire instables, sont à l'origine de changements de formes. Or, - et c'est là le point crucial - si l'on cherche à supprimer ces singularités instables en changeant la valeur des paramètres agissant sur la fonction, ces singularités instables *réapparaissent* pour des valeurs différentes des paramètres. Elles sont

donc présentes - et c'est là leur valeur ontologique - dans le *germe* même de la fonction.

La base mathématique minimale

Les catastrophes sont donc des objets mathématiques, à l'instar des formes euclidiennes rond, carré, triangle, ou des solides platoniciens. On peut se les représenter par l'imagination mais il est dommage de ne pas toucher du doigt leur réalité. Nous procéderons pas à pas en reprenant la démonstration de Jean Petitot au séminaire *L'identité* de Claude Lévi-Strauss en 1977⁸. Dans une fonction notée $y = f(x)$, nous sommes en présence de trois objets représentés par des symboles ; un premier objet, la variable x , influe par l'action de la fonction f (qui peut être une force physique, une opération, un traitement algorithmique) sur un second objet y . Le troisième objet, l'expression globale $y = f(x)$, est un objet *virtuel*, permettant la représentation de l'ensemble des *possibles* ouverts par les valeurs de x , alors même que l'on peut être en situation d'observation d'une seule de ses valeurs, c'est-à-dire la valeur prise par x au moment où l'on exécute la fonction. La fonction permet donc une virtualisation du réel : y sera potentiellement *ceci* si x s'actualise dans telle ou telle valeur. La connaissance de la fonction permet la connaissance de l'inédit. En appliquant cette représentation mathématique sur des objets du réel, on peut donc rendre intelligibles leurs transformations potentielles. Il existe des domaines de la réalité qui n'obéissent pas à des représentations mathématiques de ce type. Leur représentation par des fonctions numériques est alors une modélisation, c'est-à-dire une simulation, une approche certes réductrice, mais qui permet d'explorer un domaine considéré. Partons maintenant d'une fonction numérique simple :

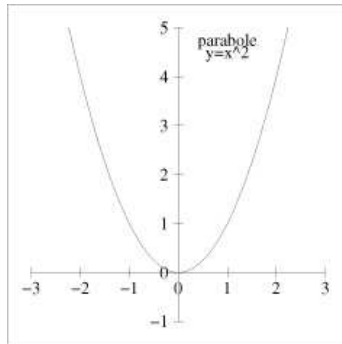
$$y = x^2 \quad (1)$$

Un objet x se voit multiplié par lui-même ($x.x$). Quand on actualise cette fonction sur plusieurs valeurs de x , on obtient les valeurs y , qui placées sur un repère orthonormé, génèrent une courbe.

6. Cf. Le *Dictionnaire étymologique de la langue française*, Bloch & Von Wartburg, 1932, Puf, 1994.

7. Racine, préface d'*Andromaque*, La Pléiade, Gallimard, 1999, p.197

8. Petitot J., in Lévi-Strauss C., *Séminaire L'identité*, 1977, Puf, 1983.

FIGURE 2 – Courbe obtenue par l'équation $y = x^2$

Elle est une parabole avec un sommet inversé, un *point d'inflexion*, quand la valeur de x est égale à 0 (si $x=0$, $y=0$; $x=1$, $y=1$, si $x=-1$, $y=1$, si $x=2$, $y=4$, si $x=-2$, $y=4$). Si l'on ajoute maintenant un paramètre u associé à x on obtient une nouvelle équation :

$$y = x^2 + ux \quad (2)$$

Selon la valeur prise par le paramètre u , la position du point d'inflexion se modifie mais la forme globale de la courbe reste identique. Quelque soit la valeur du paramètre u , donc quelque soit la perturbation que l'on exerce sur la fonction, sa forme reste identique : il n'existe qu'un seul point d'inflexion. La courbe est donc *structurellement* stable même si on la perturbe en modifiant le paramètre. Tout change que l'on passe à une fonction portant la valeur de x au cube (la valeur de x multipliée par elle-même, puis encore par elle-même) :

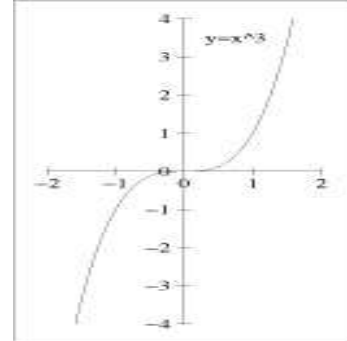
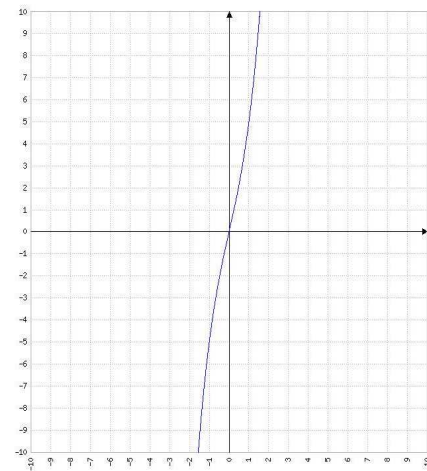
$$y = x^3 \quad (3)$$

La valeur de x portée au cube génère alors une inflexion du sens de la courbe.

En associant à cette fonction, un paramètre u supplémentaire lié à la valeur de x , on obtient une modification de la forme de courbe :

$$y = x^3 + ux \quad (4)$$

En résolvant l'équation, on met en évidence deux solutions correspondant aux valeurs du paramètre u , soit positive, soit négative.

FIGURE 3 – Courbe obtenue par l'équation $y = x^3$ FIGURE 4 – Courbe de la fonction $y = x^3 + ux$ avec le paramètre de contrôle u positif. Quelle que soit la valeur de u positif, la forme de la courbe reste topologiquement identique, sans point d'inflexion supplémentaire.

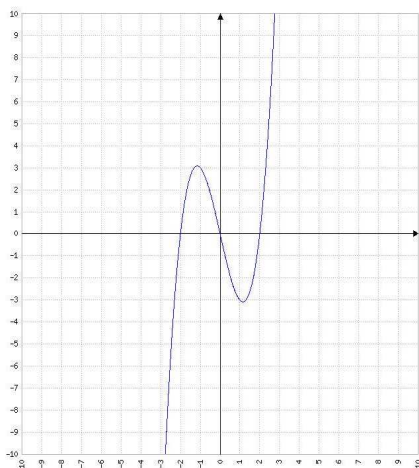


FIGURE 5 – Courbe représentant la fonction $y = x^3 + ux$ avec le paramètre de contrôle u négatif. La courbe présente une morphologie qualitativement distincte. Une variation du paramètre de contrôle (changement de signe) génère un changement *catastrophique*.

Au voisinage de $u = 0$, une petite modification de u entraînera une modification (catastrophique) de la forme de la fonction. On appelle alors *points réguliers* les valeurs de u différentes de 0, correspondantes aux formes stables de la courbe et *points singuliers* ou *catastrophiques* les points correspondants à la valeur de $u = 0$. Si on modifie légèrement la valeur de u on déstabilise la fonction en la forçant à prendre l'une des deux formes possibles. L'une des formes (Cf. Figure 5) présente un point d'inflexion de plus que la forme présentée sur la figure 4. Elle est donc qualitativement différente. Le paramètre u contrôle donc la forme de la courbe et sera nommé *paramètre de contrôle*. On a défini ainsi la catastrophe du *pli* dont l'espace de commande est à une seule dimension (un seul paramètre de contrôle u) et l'ensemble de bifurcation est un point unique. En rajoutant à cette fonction d'autres paramètres externes (u, v, w, t), on complexifie le nombre de solutions et on aboutit à un ensemble catastrophique qui n'est plus un point, mais un ensemble à deux, trois, ou n dimensions. L'idée centrale est que les formes apparentes prises par une fonction, et par extension par un objet quelconque modélisé par une fonction, sont déterminées

par des ensembles de valeurs des paramètres. Ces ensembles possèdent une géométrie, ou plus exactement une topologie, parfois si complexe qu'on ne peut l'appréhender que par des sections locales.

À partir de cette modélisation, on peut rendre compte de la génération de la forme d'un objet observé par l'étude de l'équation réunissant ces paramètres. Tant que les valeurs de ces paramètres restent incluses à l'intérieur de l'ensemble catastrophique, ou sont extérieures à lui, on est en présence de milieux homogènes (ensembles de points réguliers). Par contre, lorsque les valeurs des paramètres franchissent les limites de l'ensemble de bifurcation (des strates) apparaissent des discontinuités (des ensembles de points singuliers) et des changements catastrophiques d'états de la fonction. René Thom a montré, que dans l'ensemble des fonctions différentiables possibles, certaines fonctions ont des propriétés singulières. Par exemple, la famille des fonctions $f_{u,v}(x)$ dépendant de deux paramètres de contrôle u et v :

$$f_{u,v}(x) = x^4/4 + ux^3/2 + vx \quad (5)$$

Pour u et v fixés, la courbe de $f_{u,v}$ est soit de type I (à un seul minimum) soit de type II (deux minima séparés par un maximum). Ces *minima* et cet *extremum* correspondent aux valeurs de x pour lesquelles la dérivée $f'_{u,v}(x)$ de $f_{u,v}(x)$ s'annule, c'est-à-dire aux racines de l'équation dérivée :

$$f'_{u,v}(x) = x^3 + ux + v = 0 \quad (6)$$

Cette équation du troisième degré possède soit trois racines réelles, ce qui lorsqu'elles sont distinctes, correspond au type 2 (deux *minima*, un *extremum*); soit une racine réelle et deux racines imaginaires conjuguées, ce qui lorsqu'elles sont distinctes correspond au type 1 (un *minima*). Il existe donc un point singulier, dit *catastrophique*, correspondant à la valeur de contrôle au voisinage duquel il est possible de passer du type I au type II et réciproquement. Le passage s'effectue au point d'inflexion de la courbe, c'est-à-dire lorsque l'équation dérivée $f'_{u,v}(x) = 0$ admet une racine double réelle. Le lieu des points catastrophiques de l'espace externe (u, v) est donc le

lieu discriminant Δ (exprimant les possibilités de solutions à l'équation) :

$$\Delta = 4u^2 + 27v^2 \quad (7)$$

L'équation résultante du discriminant :

$$4u^2 + 27v^2 = 0 \quad (8)$$

est celle d'une parabole symétrique par rapport à l'axe des u . Elle admet à l'origine une singularité de rebroussement d'où son nom de *cusp* donné à cette catastrophe élémentaire. Autour de la valeur 0 de tous les paramètres, donc sans l'effet des paramètres u et v , on obtient la distribution des potentiels $f_{u,v}$ (donc autour du point instable, $f_0 = x^4/4$). Cette distribution regroupe les deux types élémentaires de catastrophes. Les catastrophes de bifurcation (par franchissement des strates externes du *cusp*) et les catastrophes de conflits où les deux minima sont à la même hauteur. Si l'on porte ensuite les valeurs des *extrema* de $f_{u,v}(x)$, au dessus de (u, v) on obtient dans l'espace (x, u, v) une surface nommée *fronce*. L'équation de cette fronce $f'_{u,v}(x)$ est le *déploiement universel* de la fonction première $f_{u,v}(x)$. Elle contient et ordonne toutes ses formes stables dérivables. Cette mise en ordre par le *cusp* n'est pas une simple énumération des cas possibles. Elle positionne tous ces cas possibles les uns par rapport aux autres. Elle est donc un *espace classifiant* informé par une catastrophe discriminante, ici la fronce, elle-même engendrée par un *centre organisateur*, le potentiel instable f_0). Ce centre organisateur contient toute l'information nécessaire et suffisante pour l'ensemble des formes apparaissant dans le déploiement universel de cette singularité⁹. C'est là une donnée de grande importance car elle permet de réduire la diversité des actualisations de formes prises par la courbe à une singularité unique, un germe, non seulement porteuse de toutes les virtualités possibles, mais les organisant au sein d'une structure ordonnée.

9. Thom R., *Paraboles et catastrophes*, 1980, Flammarion, 1983, p. 70.

Les catastrophes élémentaires

La catastrophe est la plus simple est celle du *pli*. Son espace de contrôle est à une seule dimension (un seul paramètre), l'espace des états est à une seule dimension, et son ensemble de bifurcation est un point. Par exemple, à pression constante, il existe un point d'ébullition de l'eau : l'augmentation de la température au-delà d'une valeur critique fait apparaître un nouvel état (la vapeur). La catastrophe élémentaire du pli est présente dans toutes les formes bidimensionnelles. Intuitivement, la perception d'un pli, par exemple un pli de terrain en géologie, fait naître la représentation d'une force appliquée sur la matière du substrat et l'ayant courbée¹⁰. Si l'on rajoute un facteur de contrôle supplémentaire, le pli devient une *fronce*. Son espace de contrôle est à deux dimensions (deux facteurs de contrôle), l'espace des états est à une seule dimension et son ensemble de bifurcation est une surface (*le cusp*), projection du contour de la fronce (surface de réponse). La fronce modélise les situations bimodales où un système peut bifurquer d'un état à un autre. Elle permet de rendre intelligible le phénomène apparent de la possibilité d'une transition continue entre deux états et pour d'autres valeurs des facteurs de contrôle, la possibilité d'une transition brusque, une catastrophe au sens usuel du terme.

La figure 6 représente la catastrophe de la fronce. En x , est représenté l'espace des variables d'états, avec ici une seule dimension, avec deux états stables A_1 et A_2 , considérés comme attracteurs du fait de l'orientation d'un gradient de potentiel énergétique supposé existant sur l'ensemble du système, le plan u et v est celui de l'espace de commande, u et v étant deux paramètres de contrôle. Sous la surface de réponse de la fronce, est projeté sur le plan (u, v) le contour apparent du *cusp* avec ses deux strates externes correspondant aux catastrophes de bifurcation et une strate centrale, dite *la ligne de Maxwell*, correspondant à la catastrophe de conflit. Toute combinaison de valeurs de variables de commande détermine un point de l'es-

10. Gilles Deleuze a consacré un essai entier au pli dans ses liens avec Leibniz et le Baroque, *Le pli*, Les éditions de Minuit, 1988. « L'inflexion est une idéalité ou virtualité qui existe actuellement que dans l'âme qui l'enveloppe. Aussi est-ce l'âme qui a des plis, qui est pleine de plis. » p.31.

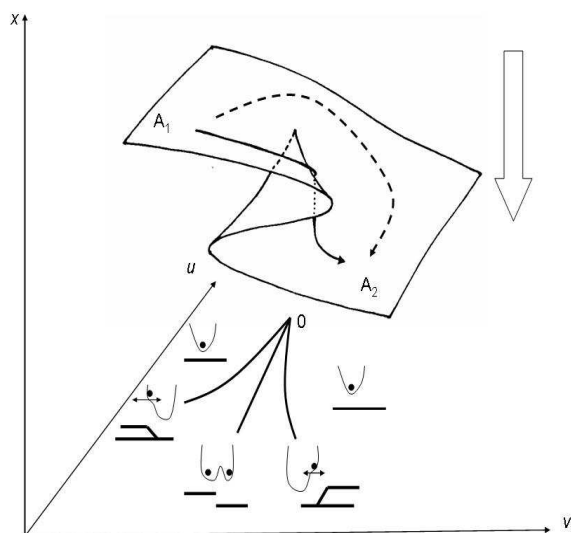


FIGURE 6 – La catastrophe de la fronce (explications dans le texte)

pace de commande. Au-dessus de ce point, les points de la surface de réponse ont des valeurs égales aux valeurs de la variable d'état pour ces valeurs de commande. Pour certaines valeurs des variables (u, v) de l'espace de commande, la projection sur la surface de réponse est située dans une zone sans fronce. Pour d'autres valeurs, la projection est située sur la fronce. Pour ces valeurs, il y a changement catastrophique. Sur la surface de la fronce, deux trajectoires potentielles ont été représentées, l'une passant par la singularité générique 0 et aboutissant à un changement catastrophique, l'autre contournant 0 et entraînant un passage continu entre les deux attracteurs A_1 et A_2 . Le choix d'une trajectoire dépend d'une instance extérieure au système. Si l'on suppose que le système est soumis à un gradient énergétique (par exemple la pensateur, l'entropie, etc.) alors les attracteurs sont des minima énergétiques pouvant subir des modifications. Les graphes énergétiques représentent les attracteurs par des boules glissant le long des pentes pour aller vers la position la plus basse. Sur la ligne de conflit, l'attracteur énergétique se scinde en deux mais c'est une position instable. Si l'on assimile maintenant les attracteurs à des *objets* on obtient des schémas actanciels qui sont représentés également sur

la figure 6. Ces schémas actanciels sont en nombre réduit et limité à quatre. Il s'agit de la confluence, de la scission, de l'existence et de la disparition.

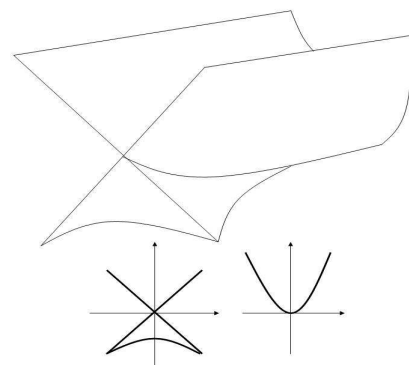


FIGURE 7 – Espace de bifurcation de la queue d'aronde avec des sections locales.

Ces éléments d'interprétation se retrouvent dans les autres catastrophes de complexité supérieure. Si l'on rajoute en effet un troisième facteur de commande, on obtient une nouvelle catastrophe nommée *queue d'aronde*. Son espace de contrôle est à trois dimensions, donc encore représentable dans l'espace, l'espace des états est à une dimension et son ensemble de bifurcation est un volume. On ne peut donc pas à la fois représenter l'espace d'état et l'espace de contrôle et graphiquement on ne peut que reproduire des sections partielles. Cette catastrophe permet de modéliser l'apparition et la disparition de deux actants différents (soit des objets assimilés aux positions stables des attracteurs) simultanément. Sur le plan dynamique, une surface de type front d'onde se creuse en un sillon dont le fond est le bord d'une onde de choc.

Si l'on rajoute encore un facteur, l'espace de contrôle est à quatre dimensions (donc non représentable entièrement), échappant à l'imagination et la catastrophe résultante, celle du *papillon* ne peut être représentée que par des sections locales. Jusqu'à présent, ces catastrophes ne présentent qu'une dimension d'état. D'autres singularités existent dans des fonctions qui se déploient avec deux variables d'état x et y . Par exemple, un système dynamique peut évoluer selon deux axes différents de comportement.

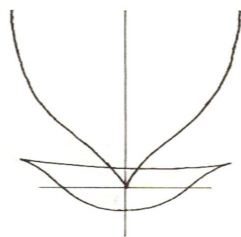


FIGURE 8 – Sections dans l'espace de bifurcation d'un l'ombilic parabolique.

Dès lors, la complexité des catastrophes entrave toute représentation globale et impose des sections locales dans les espaces de bifurcation qui sont multidimensionnels. C'est le cas de la série des trois *ombilics* (hyperbolique, elliptique, parabolique).

Combinaison de catastrophes

Toutes ces catastrophes sont de complexité croissante et les catastrophes de complexité supérieure sont des combinaisons des catastrophes de complexité inférieure. Par exemple, la fronce est constituée de deux plis, la queue d'aronde est formée d'une fronce et d'un pli. L'ombilic parabolique est une transition entre ombilic elliptique et hyperbolique et se manifeste sous la forme d'un champignon résultant de la brisure d'un jet. Chaque agrégation de catastrophes élémentaire implique un gain de dimension de l'espace dans lequel elle se réalise¹¹. Les dimensions de l'espace de contrôle (nombre de paramètres) bornent la complexité des morphologies qui peuvent s'y déployer de façon structurellement stable¹². Cette propriété, découlant du théorème de transversalité de Thom. La transversalité assure que l'image projetée d'une variété par une application est une variété de même rang. La transversalité permet une réduction de la complexité. Pour quatre variables de contrôle indépendantes, (ou moins) assurant sa régulation et

n'importe quel nombre de variables d'état pouvant être pris par le système, il n'existe que sept sortes de catastrophes élémentaires qui peuvent s'agréger (se concaténer) dans des catastrophes de complexité supérieure. Comme le réel physique, macroscopique, possède les trois dimensions de l'espace et celle du temps, les catastrophes élémentaires permettent la description des phénomènes se déroulant dans notre espace temps usuel et qui sont congruents avec notre intuition et nos capacités de représentation mentale. Le tableau 1 présente, à titre indicatif, les équations des sept singularités correspondantes aux sept catastrophes élémentaires.

Indépendance du substrat

De par leur nature mathématique, les catastrophes sont indépendantes du substrat dans lequel apparaissent les états du système, avec des déformations métriques liées à la résistance matérielle du substrat au déploiement de la forme virtuelle. Elles existent autant dans des substrats physiques que dans des substrats abstraits. Les sept catastrophes élémentaires résultent des interactions entre des états stables d'un système considérés comme des attracteurs de potentiel minimum, entités dont la nature n'a pas à être précisée a priori, puisqu'elles sont *indépendantes* du substrat dans lequel elles se concrétisent. Cette propriété découle d'un phénomène algébrique :

« La bifurcation d'un point critique de rang k ne dépend que de l'entier k et du type de la singularité résiduelle et non de la dimension $n = k$ de l'espace sur lequel la fonction est définie (...). Ce phénomène algébrique est d'importance fondamentale pour notre modèle; car il montre qu'on peut identifier le type d'une catastrophe et son origine dynamique sans qu'on ait à connaître explicitement tous les paramètres internes dont dépend le système »¹³

L'indépendance des catastrophes vis-à-vis du substrat ouvre la voie à une pensée originale, transdisciplinaire, portant sur toutes sortes de domaines ;

11. « La théorie des catastrophes élémentaires ne connaît qu'une seule manière d'agréger les catastrophes : en plongeant l'espace substrat dans le déploiement d'une singularité de dimension plus élevée. » Thom R., *Apo-logie du Logos*, Hachette, 1990, p. 394.

12. Petitot J., *Morphogenèse du sens*, I, Puf, 1985, p. 119.

13. Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972, Deuxième édition, InterEditions, Paris, 1977, p. 62.

Pli	$V = x^3 + ux$
Fronce	$V = x^4 + ux^2 + vx$
Queue d'aronde	$V = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
Papillon	$V = x^6 + ux^4 + vx^3 + wx^2 + zx$
Ombilic hyperbolique (vague)	$V = x^3 + y^3 + uxy + vx + zy$
Ombilic elliptique (pic)	$V = x^3/3 - xy^2 + u(x^2 + y^2) + vx + zy$
Ombilic parabolique (champignon)	$V = x^2y + y^4 + ux^2 + vy^2 + vx + zy$

TABLEAU 1 – Liste des singularités (germe et déploiement) créant les catastrophes élémentaires.

biologie, sociologie, psychologie, esthétisme, philosophie (...). Elle peut donc être applicable, *a priori*, à la modélisation du psychisme sans qu'il soit nécessaire d'effectuer une réduction aux processus neurophysiologique sous-jacents aux opérations mentales. Comme elles sont indépendantes du substrat, et donc indifférentes à sa résistance, elles se propagent d'espace substrat en espace substrat (principe de contagiosité) et sont juste déformées métriquement par les propriétés différentes des substrats. Toute discontinuité existant dans un espace tend à se propager dans un espace proximal comme le montre l'exemple de deux oscillateurs couplés dont l'un manifeste une irrégularité qui va perturber le fonctionnement de l'autre. C'est là un principe essentiel car il peut rendre compte de la propagation de catastrophes dans des domaines disjoints sur le plan des variables d'états comme sur celui des variables de commande. Des formes similaires existant dans des substrats différents relèvent de la même dynamique catastrophique d'engendrement et tendent à se coupler (mise en résonance par attraction des formes similaires). Toute forme, quel que soit son substrat, peut être comparée avec les morphologies des ensembles abstraits de bifurcation. Si la comparaison atteste que les deux formes sont isomorphes, alors les deux formes ont été engendrées par la même dynamique quel que soit l'espace substrat dans lequel elles se concrétisent. Cette propriété est remarquable sur le plan épistémologique. Elle offre la possibilité de pouvoir penser l'articulation entre des espaces de substrat différent mais qui sont « travaillés » par un même système dynamique.

Internalisation des variables de contrôle

Une des propriétés les plus singulières des catastrophes est que les dimensions externes d'une dynamique, soit les paramètres de contrôle du système, peuvent s'internaliser dans le système et devenir des variables d'état. Cette propriété est fondamentale pour décrire la possibilité d'une transmission à un descendant de caractères acquis pendant la vie d'un organisme parent en dehors de tout support génétique classique (mendélien). Cette transmission peut se comprendre comme une internalisation des variables externes (par stabilisation des seuils opérant sur un front d'onde de déploiement). Par exemple, le conflit entre deux puissances opposées, comme dans une guerre, se stabilise sur une ligne de front, et génère une morphologie (la tranchée, la fortification, la défense) qui encode les facteurs externes, spatiaux, qui influaient sur la dynamique. Des dynamiques catastrophiques se produisant dans une strate du réel (à un niveau) sont représentées par des singularités *inscrites* sur une autre strate, à un autre niveau. La théorie des catastrophes permet ainsi une intelligibilité des *inter niveaux*. Elle lève l'inconnue des transitions entre les niveaux du réel décrits par les différentes disciplines. Elle est donc par essence transdisciplinaire. Elle permet, en théorie, de lever les inconnues sur les modes de transition entre niveaux, par exemple entre le niveau neurophysiologique et le niveau des opérations psychiques. Enfin, les catastrophes peuvent être interprétées en substance comme des dynamiques génératrices de morphologies et/ou en acte comme des dynamiques génératrices de structures, classifiant des positions virtuelles pouvant être occupées par des actants et s'opposant entre elles dans des relations différentielles (au sens du structuralisme).

Modalités générales d'applications

De façon générale, dans les applications de la théorie des catastrophes, on assimile un objet étudié à un système susceptible de prendre un certain nombre d'états stables générés par une dynamique interne qui peut être connue comme elle peut être inconnue. Ces états sont décrits dans un ensemble de variables descriptives du système (variables d'états dans l'espace des phases prises par le système). En contrôlant les valeurs des paramètres de contrôle qui varient dans un autre espace (espace externe ou de commande), on modifie les états apparents de ce système. Les variations sur les paramètres de contrôle déclenchent des changements d'états du système. Cette formulation minimale est applicable de façon très générale à toutes sortes de systèmes, qu'ils soient physiques, biologiques, ou psychologiques. Dans n'importe quel système composé de forces en interactions constantes et soumis à une dynamique interne, il existe des zones critiques (ensembles de bifurcations composés de points singuliers) où la variation d'un facteur de contrôle même de faible intensité fait bifurquer radicalement l'état d'un système vers un autre état, et des zones stables, (composées de points réguliers) résistantes aux perturbations, c'est-à-dire aux variations des facteurs de contrôle. Dans tout conflit (c'est-à-dire dans toute interaction de forces), il existe une zone critique (temporelle, spatiale ou sur toute autre dimension) où une bifurcation catastrophique peut intervenir à la suite d'une action minime sur cette zone. À proximité du centre organisateur d'une morphologie, il existe une sensibilité particulière aux bifurcations. Ces zones critiques, ou moments critiques si l'on se place sur un référentiel temporel, sont particulièrement apparents dans les conflits.

Pour prendre un exemple récent, la catastrophe de la queue d'aronde a été utilisée en polémologie pour modéliser la dynamique de conflit, telle qu'elle a été pensée par Julien Freund (transition d'un état agonale vers un état polémique)¹⁴. Pour Julien Freund, l'antagonisme directeur est singularisé par une attraction grégaire polarisant le social en deux camps ami / ennemi. L'antagonisme foyer crispe la situa-

tion et installe le recours à la violence, moment propice à la manifestation de l'intention hostile qui détermine la bascule dans l'état polémique où le tiers est exclu. Clément Morier et Lydie Thollot ont proposé le modèle de la queue d'aronde, complexification d'un pli correspondant à l'état polémique, pour expliquer le phénomène observable de relaxation conflictuelle permettant la réintroduction d'un tiers (Cf. Figure 9). La transformation du pli anguleux en queue d'aronde, contenue à l'état de virtualité dans le pli initial (état agonale) relève l'émergence d'une nouvelle propriété fonctionnelle (un nouveau facteur de contrôle) permettant la reconnaissance des ennemis dissociés. Le modèle proposé apporte un gain d'intelligibilité en montrant, par le modèle de la queue d'aronde, l'existence de deux types d'état agonale, alors que phénoménologiquement on n'en distingue qu'un seul. Le premier est celui de la paix impliquant l'équilibre des inimitiés et la triangulation des conflits par les tiers (pli simple), le second est celui de la relaxation, situation agonale transitoire entre la guerre et la paix, correspondant à l'espace de bifurcation de la queue d'aronde entre le pli initial et le pli anguleux.

En psychologie du développement, l'existence de moments critiques peut être décrit comme un ensemble de points réguliers dans une trajectoire de développement stable et de points singuliers où une perturbation environnementale, même de petite intensité, fait bifurquer le développement vers une autre trajectoire, souvent de façon irréversible. En psychologie de la perception auditive, un élément singulier du signal, par exemple un transitoire acoustique de faible durée, va déclencher une gnosie (une catégorisation) à la différence des composantes stables du signal. En perception visuelle, la discrimination d'un croisement de contours de forme (ensemble critique de points singuliers) génère un effet de vision en trois dimensions. Des applications classiques de la fronce en psychologie de la perception concernent les figures d'Escher. Par glissements progressifs on passe par exemple de la perception d'un visage (attracteur A) à celle du corps d'une femme (attracteur B) ou d'un poisson à un oiseau. Tous ces phénomènes perceptifs sont bien modélisés par la fronce qui permet de différencier le point de bifurcation entre deux figures selon que le regard part d'un point ou d'un autre.

14. Morier CL., Thollot L., « De Julien Freund à René Thom, Vers le processus morphologique de la dynamique conflictuelle », *Stratégie*, N° 11°, ISC, 2015.

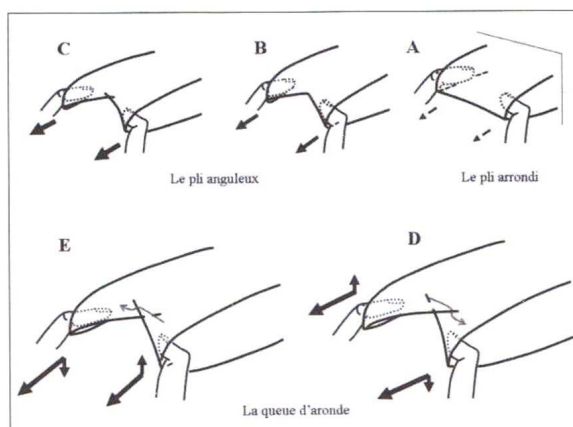


FIGURE 9 – Catastrophe du pli se transformant en queue d'aronde modélisant l'apparition d'un tiers dans une situation conflictuelle, les deux doigts tirant sur le tissu représentent les tensions de deux paramètres de contrôle indépendants, le troisième facteur de contrôle correspondant à la rigidité du tissu, et ici il est constant. En accentuant les tensions sur le pli on génère des fronces puis une queue d'aronde qui fait émerger un élément tiers. D'après Moriet Cl., Thollot L., *Stratégique*, N° 11, 2015.

Mais l'apport de la théorie des catastrophes sur la question de la perception ne s'arrête pas aux figures ambiguës. Il se prolonge sur l'importance des contours de forme pour la catégorisation perceptive. De façon générale, la perception s'accroche aux saillances (zones critiques, singularités topologiques, contours) pour construire des gnosies (ou des affordances si l'on se réfère aux travaux contemporains sur la perception). L'implémentation neurobiologique des processus perceptifs non seulement est intelligible par les processus catastrophiques (neuro-géométrie de la vision) mais l'organisation neurobiologique est *informée*, au sens de mise en forme, par des singularités¹⁵. L'architecture fonctionnelle du cortex visuel est ainsi déterminée par l'extraction de ces singularités de forme. Ces zones critiques sont des ensembles de points singuliers définissant une extension topologique qui est indépendante de la nature du substrat dans lequel elle se manifeste. Ces zones peuvent être

réalisées dans un espace physique (3D/T) et donc nous être apparentes, mais nous pouvons aussi percevoir simplement une section locale d'une zone de plus grande complexité dimensionnelle et dont nous ne percevons qu'une partie résultant d'un collapse dimensionnel (d'une projection d'un ensemble à n dimensions sur l'espace physique).

Idéalement, dans la construction d'un modèle destiné à rendre intelligible le comportement d'un système, voire à le prédire, les facteurs de commande sont des variables indépendantes sur lesquelles on a apposé une métrie (un référentiel) afin d'obtenir des variables quantitatives. On considère ensuite - saut conceptuel délicat dans la compréhension de la théorie des catastrophes - que les facteurs externes varient de façon continue dans un espace substrat qui peut être, *aussi*, l'espace de matérialisation des phénomènes, donc l'espace des états. Par exemple, en météorologie, l'atmosphère est l'espace d'états des phénomènes observables (les météores, pluie, grêle, nuages etc.), mais il est *aussi* l'espace substrat où varient les facteurs de commande (la température de l'air, la salinité, la pression, etc.). Dans l'espace des états apparaissent alors des formes correspondant aux espaces de bifurcation. Par exemple, un nuage (ayant une morphologie apparente) concrétise (apparaît dans l'espace substrat), le conflit (ensemble de bifurcation) entre deux masses d'air de densité (facteur de commande) différente. En considérant que l'espace externe (ensemble des paramètres de contrôle) est l'espace dans lequel les états du système se manifestent (apparaître du phénomène), ce point catastrophique va lui-même apparaître comme une discontinuité (point singulier) discriminant deux zones homogènes constituées de points réguliers, mais distinctes. Par exemple, un verre se brise et laisse apparaître des *lignes* de brisure ; une pièce de tissu se plisse en créant des *fronces*. La dimension temporelle peut être gelée par sa projection à l'infini, ou neutralisée, par une section particulière dans l'espace de bifurcation et on peut ainsi déchiffrer des formes statiques. On peut alors observer en géologie des failles, des fronces, des plis. En hydrologie, on observe des déferlements de jets ressemblant à des ombilics hyperboliques, en embryologie des mouvements d'invagination de tissus ressemblant à des superpositions de fronces. Lorsque apparaît une frontière différenciant deux tissus bio-

15. Cf. Petitot J., *Neurogéométrie de la vision*, Les éditions de l'école polytechnique, 2008.

logiques, il est possible d'y déceler une catastrophe de type pli. Toute reconnaissance d'une forme, quel que soit son substrat, physique ou psychique, peut être considérée comme résultante d'une mise en comparaison avec les morphologies des ensembles catastrophiques. Si la comparaison atteste que les deux formes sont isomorphes, alors les deux formes ont bien été engendrées par le même morphodynamisme. Sur le plan méthodologique, il est alors possible de chercher à identifier les caractères les plus saillants et les plus qualitatifs de « *l'apparaître morphologique* » des objets concrets ou idéels et de chercher à remonter vers la dynamique interne qui les a engendré.

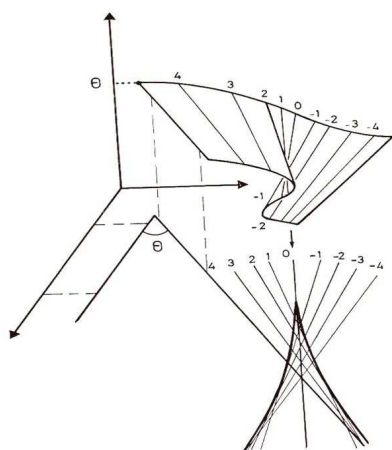


FIGURE 10 – Représentation d'une fronce générant une caustique (cf. Figure 11).

Un exemple simple concerne les caustiques (cf. les figures 10 et 11). En plaçant un verre rempli d'eau devant une source lumineuse, on observe sur une table une forme lumineuse ayant un aspect caractéristique. Si l'on remue le verre, la forme change de taille, s'allonge ou se raccourcit mais elle conserve sa forme. Sa métrie se modifie mais sa topologie reste identique. Il s'agit du cusp d'une caustique, générée par la projection sur l'espace plan de la table de la catastrophe de la fronce. Celle-ci est inobservable mais bien présente et ses propriétés sont à la source d'un phénomène réel, celui-ci bien observable. Cet exemple est paradigmatique de la méthode en théorie des catastrophes. On relève des morphologies apparentes, on ignore leurs attributs métriques, quantitatifs, on

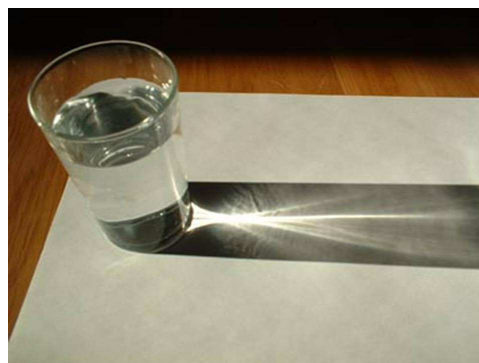


FIGURE 11 – Caustique générée à travers un prisme. En bougeant le verre, le cusp change de taille mais conserve sa forme topologique.

néglige les contraintes inhérentes au substrat, mais on en déduit l'existence d'entités virtuelles, les catastrophes qui sont leurs véritables déterminants.

La biologie théorique de René Thom

Thom a proposé des modèles catastrophiques dans toutes sortes de domaines, en sciences exactes (physique), en sciences humaines (linguistique, psychologie, sociologie, esthétique). Nous ne pouvons tous les commenter mais nous devons faire une place particulière à la biologie. Thom a proposé en effet une vision nouvelle et profonde de la biologie, critiquable par de nombreux aspects, mais toujours intéressante. Elle débute en 1961 par la visite de Thom à un musée d'histoire naturelle. En voyant le moulage en plâtre représentant la gastrulation de l'œuf de grenouille. Il remarque que le sillon circulaire qui se formait pour se refermer par la suite, *ressemble*, à l'image d'une fronce. Cette vision mathématique, selon son propre terme, a été à l'origine des modèles biologiques proposés par Thom¹⁶. Sa rencontre au symposium de Bellagio (1966) avec le biologiste Conrad Waddington (1905-1975), qui envisageait le développement de l'embryon comme un réseau de voies privilégiées, isolées des perturbations externes (chréodes) fut un second moment décisif. S'appuyant sur son hypothèse de la canalisation du développement, Waddington

16. Thom R., *Paraboles et catastrophes*, 1980, Flammarion, 1983, p. 45.

montra que le système épigénétique imposait certaines contraintes à l'expression des mutations et à l'emprise des perturbations externes, déterminant par là le registre et les directions possibles du changement évolutif. Il expliquait ainsi certaines adaptations par l'hypothèse de l'assimilation génétique des caractères acquis. Thom reprendra ces idées et considérera, hypothèse fondamentale, que le génome n'encode que les facteurs de contrôle d'une dynamique catastrophique de déploiement de l'organisme. Les gènes ne sont donc pas des programmes dont l'exécution génère directement les formes biologiques mais des paramètres de contrôle du déploiement :

« ce rôle (celui du génome), se réduit à canaliser le déploiement de l'attracteur du métabolisme, en spécifiant éventuellement les amplitudes relatives de tel ou tel oscillateur. Et aussi bien sûr, en fournissant le moment venu et au lieu approprié, les protéines nécessaires à la synthèse de tel ou tel constituant organique. Mais cette modulation spatio-temporelle est dans une large mesure extra génétique : il n'y a aucun codage concret et précis. »¹⁷

Les morphologies biologiques sont des effets de la spécialisation cellulaire permettant une réalisation de fonctions. La signification fonctionnelle de toute morphologie biologique (organe, organite), possède une structure géométrique ou topologique. Toute spécialisation cellulaire est caractérisée par un régime stable du métabolisme local. Elle peut donc être assimilée à un attracteur de la cinétique biochimique. La fonction du tissu cellulaire correspondant à ce régime stable est une expression de la structure topologique de cet attracteur¹⁸. En généralisant, Thom considère que le déploiement du vivant est issu de singularités génériques présentes, de façon délocalisée, dans ce qu'il nomme *le métabolisme*, soit l'espace multidimensionnel, complexe, irréprésentable, de l'ensemble des interactions biochimiques. Ces singularités génériques constituent *la figure de régulation globale* de l'organisme. Thom adopte ici un point de vue proche du vitalisme. Sa conception des figures de régulation pilotant le plan d'organisation

des organismes ressemble à celle des entéléchies de Goethe. Elle est hypothétique mais cela n'est pas en soi un défaut et on pourrait rapprocher l'hypothèse de cette figure de régulation globale de l'organisme, non objectivée, des conceptions de Darwin, ignorant l'existence des gènes, et faisant l'hypothèse de l'existence de *gemmules* sur lesquels portent la transmission de la variation. Pour Thom, il existe pour chaque organisme une figure de régulation virtuelle, possédant des propriétés morphodynamiques, qui se déploie comme un front d'onde dans l'ontogenèse et se rétracte dans la gamétogenèse vers le centre organisateur de la structure de régulation. Les fonctions physiologiques, comme les fonctions psychologiques, sont des processus de correction (de régulation) des déséquilibres induits dans l'espace métabolique de base sur lequel opère la dynamique interne de la vie. Chaque fonction physiologique, cognitive, psychique, ou comportemental sont des processus de correction catastrophique des discontinuités apparaissant dans le déploiement de cette figure globale de régulation. En biologie, la définition d'une fonction exprime un ensemble de processus destinés à maintenir une caractéristique ou une propriété du système considéré malgré les variations du milieu *extérieur*¹⁹. Thom renverse la proposition en faisant de la fonction une correction des catastrophes de déploiement de l'ontogenèse. Par exemple, le rôle coordinateur du système nerveux reconstitue les champs fonctionnels primitifs rompus par les catastrophes de l'organogenèse. La forme spatiale de certains organes est donc déterminée non pas par une variation heureuse liée à des mutations hasardeuses et stabilisée par l'adaptation mais par la réalisation concrète dans le substrat tissulaire de la figure globale de régulation de l'organisme. Comme les catastrophes sont dotées de la propriété d'internalisation des variables externes en variables d'état, le développement est marqué par une contamination progressive des variables internes intervenant dans les catastrophes de différenciation par les coordonnées spatiales du déploiement.

Pour Thom, cette évolution atteint son terme extrême dans les chréodes à caractère métrique, comme celle de l'œil ou des membres et dans ces cas, il y a presque un isomorphisme entre l'espace in-

17. Thom R., *Esquisse d'une sémiophysique*, Interéditions, 1988, p. 127.

18. Thom R., « Une théorie dynamique de la morphogenèse », *Towards a theoretical biology*, I. C.H. Waddington (ed.), University of Edinburgh Press, 1968, 152-166.

19. Delattre P., Structure et fonction, *Encyclopédia Universalis*, p.702, tome 22.

terne et l'espace galiléen de la mécanique du monde extérieur²⁰. La morphogenèse résulte du déploiement progressif de cette figure de régulation virtuelle. Sa dynamique s'exprime dans le métabolisme général, induisant les différenciations cellulaires, les ontologies d'organes et les spécialisations fonctionnelles. Elle se rétracte dans les gamètes en ayant été modifiée par l'expérience acquise. Thom, à contre-courant de la biologie, va ainsi assumer pleinement un néo-lamarckisme. Pour lui, la fonction crée l'organe ou plus exactement la formation de l'organe résulte d'un conflit entre un champ primitif à vocation fonctionnelle et une matière première organique qui lui résiste et lui impose des chemins de réalisation (chréodes) génétiquement déterminées²¹. Si un organisme est mis au contact d'un stimulus externe exceptionnel, pour lequel il ne dispose d'aucune réponse adaptée innée préconditionnée (physiologique ou comportementale), il doit alors mettre en œuvre des régulations inédites destinées à compenser l'effet perturbateur du stimulus. Comme toute régulation s'effectue par une dynamique globale structurée sur un ensemble de bifurcation stratifié (un ensemble de points singuliers), elle se stabilise sur un centre organisateur possédant une topologie particulière. Si ce même organisme est porteur d'une mutation génétique ayant généré un autre centre organisateur, le phénomène de l'attraction des formes (de la contagion des catastrophes) va entraîner le nouveau centre issu de la mutation génétique à se coupler et donc à être influencé par le centre organisateur acquis par l'adaptation au stimulus nouveau. Il sera alors transmis sous une forme modifiée à la descendance, permettant ainsi l'hérédité d'un caractère acquis. Thom compare le processus à une permutation entre cols, c'est-à-dire géographiquement comme une capture d'un des cours d'eau du paysage par un affluent latéral²².

Le modèle de la prédation

Le déploiement de la figure globale de l'organisme ne s'arrête pas à l'embryogenèse. Il se perpétue dans les

fonctions physiologiques, puis dans d'autres systèmes de régulation comme les conduites animales. Ainsi, la singularité de la fronce, section minimale dans la figure de régulation, se réalise, de façon isomorphique, dans la différenciation des trois tissus embryologiques, l'ectoderme (perception), le mésoderme (action), et l'endoderme (digestion), puis dans la structure de la prédation séparant le prédateur, la capture et la proie.

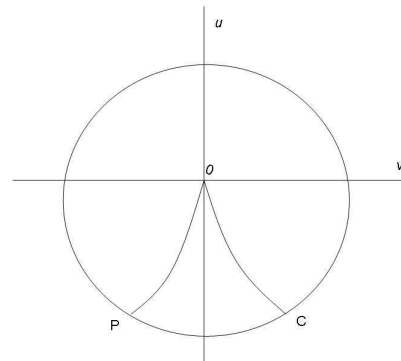


FIGURE 12 – Lacet de la prédation, en C le prédateur capture sa proie puis l'ingère, moment de confusion des actants, puis en P le processus de perception se reproduit à nouveau, lié aux propriétés saillantes de la proie. Le cycle rencontre un cusp, ensemble de bifurcation d'une fronce.

La prédation est un comportement de régulation s'effectuant par une catastrophe de fronce à deux actants (la proie et le prédateur). La catastrophe de capture de la proie la fait disparaître comme actant mais induit une confusion des actants car à un moment donné du cycle de la fronce, le prédateur devient sa propre proie (Cf. Figure 12). Des raffinements de ce modèle ont été effectués en intégrant le sommeil, la digestion, les comportements de chasse, etc. Le principal est que l'ensemble de ces conduites est déterminé par l'actualisation répétée d'un cycle contraint par une catastrophe, en l'occurrence une fronce. Le schéma de la prédation préexiste à ses actualisations. Le prédateur peut être assimilé à un sujet intentionnel aliéné dans l'image de la proie²³.

20. Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972, Deuxième édition, InterEditions, Paris, 1977, p. 165.
21. Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972, Deuxième édition, InterEditions, Paris, 1977, p. 204.
22. Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972, Deuxième édition, InterEditions, Paris, 1977, p.290

23. Petitot J., *Physique du sens, De la théorie des singularités aux structures sémio-narratives*, Editions du CNRS, 1992. p. 276.

Mais si la prédation, conduite adaptative vitale, est bien guidée par le déploiement de la catastrophe élémentaire de la fronce (perception et capture), elle induit une difficulté logique. La première catastrophe de capture de la proie (franchissement de la première strate) est compatible avec la recherche de l'abaissement d'énergie (convention de Maxwell). Par contre la catastrophe de perception (franchissement de la seconde strate) nécessite un saut énergétique inverse d'un état de faible énergie vers un état métastable de plus haute énergie (comme le montre l'exemple du flambage de la scie égoïne qui nécessite une poussée externe pour retrouver sa position initiale), ce qui est contraire au présupposé énergétique de la convention de Maxwell. Thom imagine alors une solution à cette difficulté logique. Pour que ce saut puisse se réaliser, il est nécessaire que la proie soit dotée de qualités propres à remobiliser énergétiquement le prédateur. La perception est orientée vers la recherche de formes saillantes déclenchant des réactions physiologiques de grande ampleur car mobilisant les prégnances de l'organisme (faim, peur, sexualité). Le phénomène des stimuli (*supra releaser*) vient à l'appui de cette idée de formes saillantes, dont la topologie, induit des conduites indépendamment de la nature réelle de l'objet (cas de l'oie couvant un ballon de rugby). Les notions de *saillance* (qualités perceptives générées par des singularités perceptives) et de *prégnance* (énergie mobilisée par la qualité) permettent de dépasser la difficulté logique. La détection des saillances de l'objet enclenche la mobilisation énergétique des prégnances biologiques adaptatives. La proie est une forme saillante sur lequel s'investit la prégnance de la recherche alimentaire. Thom développera alors une conception, dite *sémiophysique*, bâtie sur les articulations entre les saillances et les prégnances adaptatives. Issues de notre ascendance animale, les prégnances et les saillances sont les éléments de base des conduites symboliques humaines. Les prégnances s'investissant sur les formes saillantes les transforment en objets signifiants, en objets de valeur, insérés dans les structures sémiotiques et singulièrement dans la structure canonique de la prédication linguistique, celle qui distingue en toutes langues le sujet, le verbe et l'objet. Les trois dimensions, embryologique, comportementale, linguistique, apparemment si distinctes, si hétérogènes, sans aucun

lien intelligible entre elles, se retrouvent être l'actualisation d'une même structure de régulation.

La linguistique de René Thom

Pour Thom, le langage est une expression des catastrophes originaires, biologiquement fondées, et les réalisant dans les structures verbales. Les travaux du linguiste français Lucien Tesnière seront ainsi réinterprétés. Tesnière considérait la phrase nucléaire sujet - verbe - objet comme la linéarisation d'un drame mettant en jeu des protagonistes associés dans des interactions dont le verbe est le vecteur :

« La phrase est un ensemble organisé dont les éléments constituants sont les mots. Tout mot qui fait partie d'une phrase cesse par lui-même d'être isolé comme dans le dictionnaire. Entre lui et ses voisins, l'esprit aperçoit des connexions, dont l'ensemble forme la charpente de la phrase. Ces connexions ne sont indiquées par rien. Mais il est indispensable qu'elles soient aperçues par l'esprit, sans quoi la phrase ne serait pas intelligible. »²⁴

Les valences des verbes, c'est-à-dire le nombre d'objets / actants qui leur sont associés sont limitées à quatre dans toutes les langues du monde. Ainsi, *manger* comporte deux actants, le sujet et l'objet alors que le verbe *donner* comporte trois actants, l'émissaire, le destinataire et l'objet. Thom interprète cette limitation de la valence par les dimensions des catastrophes élémentaires sous-jacentes au langage. Chaque verbe peut être représenté par un graphe actanciel spécifiant le nombre d'actants en interaction et le type de dynamique. Chaque graphe correspond à un franchissement des strates dans les ensembles de bifurcation des catastrophes élémentaires. Il en résulte une liste close de morphologies archétypiques sous-jacentes à tous les processus syntaxiques de toutes les langues du monde.

La variété des formes linguistiques et des contenus sémantiques sont des investissements des formes archétypiques (Cf. Figure 13). Cette proposition a été peu relayée chez les linguistes²⁵. Il est probable

24. Tesnière, L., *Éléments de syntaxe structurale*, Klincksieck, Paris, 1982, p. 11.

25. Sauf des exceptions notables telles les recherches de Wildgen W., *Catastrophe theoretic semantics*, John Benjamins Publishing Company, 1982.

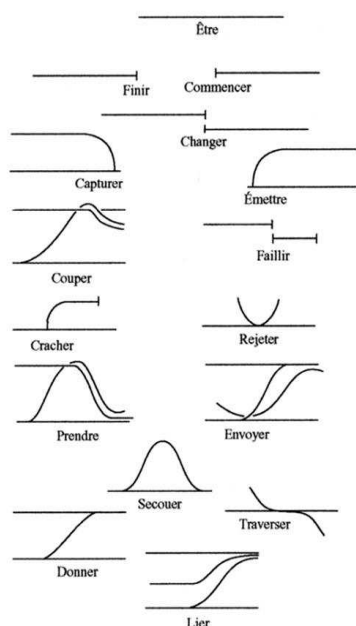


FIGURE 13 – Liste des morphologies archétypiques.

que des facteurs sociologiques aient contribué à cette méconnaissance. Thom n'est pas un linguiste de formation. Certaines de ses assertions sur la structure actancielle des verbes, ou sur l'iconicité sous jacente à toute énonciation, ont pu choquer, à l'époque, les linguistes formés par l'école saussurienne, et plus précisément par l'enseignement de Martinet pour qui le langage humain est soumis aux dogmes de l'arbitraire du signifiant et de la double articulation (traits distinctifs / phonèmes, morphèmes / sens). Il est vrai que considérer, comme le fait Thom, les marqueurs grammaticaux comme des traces de la projection des catastrophes élémentaires sur la linéarité de la chaîne verbale est une notion bien abstraite pour des linguistes peu familiarisés avec la théorie des catastrophes. Pourtant, cette projection d'une spatialité primaire sur une linéarité secondaire est très explicite quand on s'intéresse à des formes de langage singulières comme la langue des signes des sourds ou les écritures idéogrammatiques. Dans la langue des signes des sourds, l'espace de réalisation quadri dimensionnel (3D + T) permet d'éviter le collapse dimensionnel inhérent à la linéarité des

langues orales. Il dévoile de façon très claire la structure catastrophique des verbes²⁶. La langue des signes démontre que toute pensée, même abstraite découle d'une spatialité primaire, internalisée, inconsciente. En termes peirciens, la langue des signes *diagrammatise* les concepts. Ainsi, le signe gestuel pour « métaphore » est composé des deux mains représentant chacune une image se condensant sur le front, lieu des opérations intellectuelles. Le signe « deviner » est composé d'un index pénétrant virtuellement l'esprit de l'autre (Cf. Figure 14). La langue des signes permet la simultanéité des actants et utilise la coexistence dans l'espace comme grammaire implicite. Elle révèle les *fondements morphodynamiques* du langage. En langue des signes, la réalisation spatiale permet une expression des primitives sémiotiques de nature catastrophique (scission, bifurcation, fusion, apparition, disparition). On retrouve ces schèmes actanciels et ces dynamiques dans certains idéogrammes de l'écriture chinoise où l'espace de projection est cette fois bidimensionnel (Cf. Figure 15). Thom avait d'ailleurs souligné l'importance théorique des langues non linéaires pour une intelligibilité de la structure du langage²⁷.



FIGURE 14 – Le signe *deviner* en langue des signes. Figuration concrète d'un processus abstrait. L'acte de deviner est représenté par l'index (ombilic elliptique) pointé en dessous d'une main symbolisant l'esprit de l'autre. L'ensemble constitue un processus morphodynamique. Les formes gestuelles sont isomorphes au contenu schématique du concept. La langue des signes des sourds révèle de manière exemplaire l'enracinement morphodynamique du langage (document IVT.)

26. Virole B., *Psychologie de la surdité*, Deboeck, 1996, 2006.

27. Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 1972, Deuxième édition, InterEditions, Paris, 1977, p. 144.



FIGURE 15 – Idéogramme chinois signifiant *enseigner* composé de deux pictogrammes : en dessous figuration stylisée d'un enfant représenté par la silhouette d'un enfant emmaillotté et au dessus de la barre horizontale deux mains saisissant des objets (les croix) pour les insérer dans la tête de l'enfant. L'acte abstrait d'enseigner est figuré concrètement et cette figuration est structurée sur un schème actanciel de fusion.

Une conception de la métaphore

Un des intérêts des conceptions sémiotiques de Thom est de proposer une théorie nouvelle des figures de la rhétorique, métaphores et métonymies, dont on sait l'importance qu'elles ont pris en psychanalyse, avec le rapprochement fait par Lacan avec la condensation et le déplacement freudiens. Les schémas actanciels permettent une analyse nouvelle de la métaphore. Si un objet *A* possède un noyau morphodynamique générateur, topologiquement identique à celui d'un objet *B*, alors *A* et *B* peuvent être substitués dans une relation métaphorique. Dans la métaphore *la vieillesse est le soir de la vie*, les deux signifiants *vieillesse* et *soir* partagent le même schème morphodynamique de la terminaison que l'on représente par le schéma suivant : $-|$ et que l'on peut lire ainsi, quelque chose existe – puis se termine $|$. Or ce schème morphodynamique résulte d'une catastrophe de pli dont l'espace de bifurcation est un point unique. Comme ces deux signifiants possèdent un schème commun, l'analogie révèle un lien dynamique profond. En élevant les analogies au rang de vecteurs d'investigation, on génère un espace virtuel dans lequel on peut étudier le déploiement potentiel des phénomènes observés. Bien évidemment, l'investigation des schèmes communs à deux objets ne signifie pas que ceux-ci soient identiques et assimilables, - on serait alors entré dans une pensée délirante –

mais ces objets partagent une genèse catastrophique commune. Les phénomènes de convergence en biologie, les formes identiques des gouttes d'huile et des méduses²⁸, constituent des illustrations de ces analogies, fausses en matière de déterminisme par le substrat, vraies pour le déterminisme catastrophique indifférent à la nature du substrat (Cf. Figure 16). La recherche des archétypes morphodynamiques sous-jacentes aux analogies devient alors centrale chez Thom. Pour lui, c'est par l'analyse introspective des contraintes sémiotiques de l'organisation perceptive du réel que l'on peut sauver l'intelligibilité du monde²⁹.

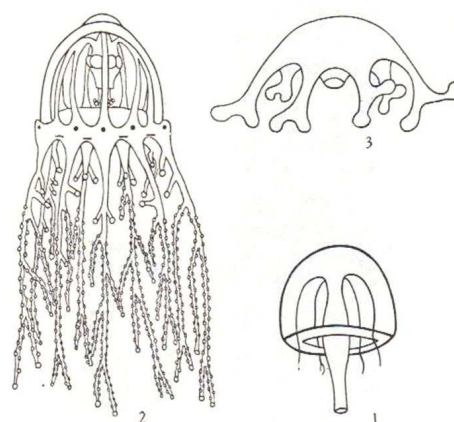


Fig. 121. Various medusoids: 1, *Syncoryne*; 2, *Cordylophora*; 3, *Cladonema* (after Allman).

FIGURE 16 – Analogies morphodynamiques entre des variétés de méduses. D'après D'Arcy Thompson, *On Growth and Form*. Une goutte d'huile dans l'eau génère des morphologies identiques.

La philosophie de Thom

La philosophie de René Thom n'est ni un réalisme strict car elle définit l'existence de structures virtuelles, les catastrophes, informant le réel, ni un idéalisme car elle privilégie la connaissance perceptive sur l'abstraction idéalisante qui déprécie les données de la perception. Penser c'est d'abord observer l'ob-

28. D'Arcy Thompson, *On Growth and Form*, the Complete Revised Edition, Dover publications, 1992.

29. Thom R., Morphologie du sémiotique, *Apologie du Logos*, Hachette, 1990, p. 65.

jet, en isoler les morphologies, et à partir d'elles à remonter sur la dynamique qui les a engendrées. L'ontologie de Thom est ainsi stratifiée en niveaux comme l'a relevé Jean Largeault³⁰. Le premier niveau est celui des phénomènes constitués d'enchaînement de causes et d'effets. Ce niveau est l'objet de la science qui cherchent à décrire les conditions des phénomènes en excluant de leur champ d'investigation les forces premières, les interactions fondamentales. La science ne considère que les relations qu'elles systématisent en termes dérivés de l'espace temps. Le second niveau de l'ontologie de Thom est celui des choses en soi, (noumènes), des archétypes, des formes catastrophiques qui *s'investissent* dans les substrats. Ces substrats peuvent être des forces ou des substances, organiques ou inorganiques. Ces archétypes sont l'objets d'interactions et de conflits quand ils se disputent le même substrat. Les analogies présentes dans la nature reposent sur la diversité des substrats informés par le même archétype.

Thom rejette le réductionnisme qui rattache tous les phénomènes à un seul type de force naturelle (les forces physiques et chimiques). Dans le réductionnisme, il existera toujours un résidu qui ne peut se déduire du principe de causalité car le rapport des forces primitives aux phénomènes n'est pas un rapport direct de cause à effet. L'action d'une cause est distincte de la cause elle-même. Ces archétypes apparaissent d'une manière irréductible dans les mathématiques (dans les germes des fonctions) et empêche la science de se ramener toute entière à une connaissance déductive. Au cours de son œuvre, Thom a progressivement instillé des références de plus en plus nombreuses à la philosophie d'Aristote. Au-delà des apparences discontinues des phénomènes, il existe une continuité ontologique, émaillée de catastrophes de bifurcation générant les espèces et les genres. Les phénomènes observables résultent de la diffusion de prégnances continues investissant les discontinuités des saillances. Cette orientation philosophique de la pensée de Thom a conduit à un éloignement des milieux scientifiques. La théorie des catastrophes, dans sa forme première, a été ainsi reléguée dans l'ombre. D'autant plus que de sévères

critiques ont été portées, non pas sur sa portée philosophique, mais bien sur sa consistance scientifique.

Critiques de la théorie des catastrophes

La critique principale est venue des objections portées par Sussman et Zahler sur la nature restrictive des conditions (existence d'une dynamique de gradient) pour lesquelles le théorème central de Thom, celui qui aboutit à une liste close de catastrophes élémentaires, reste valable³¹. Les deux auteurs critiquent ensuite le modèle de Zeeman expliquant le comportement agressif du chien (par la fronce). Selon eux, le modèle n'améliore par notre connaissance du comportement et il n'apporte aucune plus value scientifique, aucun élément nouveau. Il ne fournit aucune prédiction contrôlable malgré que la condition initiale puisse être prédictive. De plus, il ne rend même pas compte des faits déjà connus. Mais la critique de fond de Sussman et Zahler porte sur l'essence de la théorie. Pour Sussman et Zahler, n'importe quelle fonction mathématique discontinue peut rendre compte de tout phénomène naturel dans lequel une discontinuité est présente. L'analogie entre le modèle et le phénomène réel ne suffit pas. Selon eux, il faut démontrer, en plus, que le phénomène mathématique découle des hypothèses du modèle et d'une manière non banale, et qu'il ne peut être simplement une partie des hypothèses. Si ce n'est pas le cas, non seulement le modèle n'est pas correct du point de vue quantitatif, mais ses conclusions qualitatives sont souvent erronées, vagues ou tautologiques. La dépendance du modèle catastrophiste d'une hypothèse initiale avait été également relevée en 1977 par Claude Lévi-Strauss dans une discussion faisant suite à un exposé de Jean Petitot sur la théorie des catastrophes : « Mais ce que vous appelez dynamique c'est quelque chose que vous vous donnez »³². Autrement dit, les modèles catastrophiques sont des constructions bâties artificiellement sur des éléments *a priori* que l'on retrouve de façon triviale en sor-

30. Largeault J., Préface *Apologie du Logos*, Thom R., Hachette, 1990.

31. Cf. Thom R., *Paraboles et Catastrophes, entretiens sur les mathématiques, la science et la philosophie*, Flammarion, 1980, p. 180.

32. Lévi-Strauss CL., Séminaire *L'identité*, Puf, 1977, intervention dans la discussion de l'exposé de Jean Petitot, « Identité et Catastrophe », p. 151.

tie, sans gain de découverte, sans mise en évidence d'éléments nouveaux.

La biologie de Thom s'est vue aussi mise à mal par la découverte des gènes codant pour le plan d'organisation de l'organisme³³. Le problème de l'embryogenèse a été reposé différemment avec la découverte en 1991 par Edward Lewis des gènes homéotiques Hox codant pour le plan général de l'organisme. Cette découverte paraît invalider la conception de Thom d'un génome incapable d'encoder la position des cellules dans l'espace. Toutefois, les protéines qui codent pour la position des cellules sont des facteurs de transmission qui se fixent sur l'ADN et agissent comme des *morphogènes diffusants*, ce qui les relie, selon Jean Petitot, directement aux conceptions de Turing, comme à celles de Thom³⁴. Ainsi, malgré la découverte des gènes Hox, l'idée de Thom que des structures mathématiques informent, c'est-à-dire sont implémentées dans certaines formes biologiques (réseaux neuronaux, « tissus » biologiques) s'est avérée féconde. Un exemple probant récent est donné par Jean Petitot avec son analyse de la neuro-cognition visuelle : les singularités mathématiques permettant l'encodage des formes informent la structure même de l'organisation corticale visuelle³⁵. Les bifurcations catastrophiques des attracteurs dans les couches profondes des réseaux neuro-mimétiques ont été également rapprochées des modèles de Thom (syntaxe d'attracteurs). Enfin, sur le plan épistémologique, la critique de la théorie des catastrophes a porté sur son aspect platonicien. Antoine Danchin, de façon indirecte, a critiqué sévèrement la tentation platonicienne de Thom³⁶. Le holisme inhérent à la théorie des catastrophes serait une sorte de placage totalitaire sur le réel. En recherchant les singularités visibles dans les objets, on ar-

rive toujours à une vision globale. Chaque problème posé par le réel se résout en faisant l'hypothèse qu'il ne fait que refléter un aspect du tout. On aboutit alors à cette impasse qui consiste à exclure toute analyse des sous phénomènes, comme cela a pu être le cas avec l'Église refusant la dissection des corps³⁷. Dans la discussion après la communication d'Antoine Danchin, Jean Petitot a défendu l'approche catastrophique en biologie, en critiquant la méthode réductionniste qui postule implicitement qu'un modèle falsifiable (donc scientifique) est adéquat qu'à un certain niveau de description. Or, pour Petitot, le grand enjeu de la biologie est justement d'élaborer des modèles de dialectiques inter-niveaux suggérant comment les propriétés de régulation globale d'un niveau se réfléchissent en singularités locales au niveau sous-jacent et par définition, ces modèles inter-niveaux sont non falsifiables³⁸. La critique de la théorie des catastrophes la considère comme une approche qualitative dénuée de capacité prédictive, irréfutable donc a-scientifique. Elle s'apparente à un placage analogique d'entités mathématiques sur la réalité. Pour Jean Petitot, ces critiques méconnaissent le contenu spécifique de la capacité de la théorie à remonter des caractères phénoménologiques les plus saillants et les plus qualitatifs de l'apparaître morphologique vers les contraintes de la dynamique interne implicite susceptible de l'engendrer³⁹. La critique scientifique de la théorie des catastrophes la considère comme une théorie déterministe des phénomènes à partir d'entités virtuelles et ne reconnaît pas sa pertinence dans la voie inverse, celle qui part de l'observation de l'objet pour identifier les contraintes portant sur la dynamique d'engendrement. Car cette identification est purement qualitative. Elle favorise l'intelligibilité en faisant naître dans l'esprit une représentation mentale de la possibilité du déterminisme du phénomène mais elle ne fournit aucun algorithme permettant sa mesure. La théorie des catastrophes ne permet

-
- 33. Prochiantz A., « D'Arcy Thompson, zoologiste géomètre », Avant-propos à *Forme et croissance*, D'Arcy Thompson, 1961, 1992, Éditions du Seuil, Éditions du CNRS, 1994. p. 19.
 - 34. Petitot J., *Les premiers textes de René Thom sur la morphogenèse et la linguistique, 1966-1970*, 2015, hal-01265180.
 - 35. Petitot J., *Neurogéométrie de la vision, Modèles mathématiques et physiques des architectures fonctionnelles*, Les éditions de l'école polytechnique, 2008.
 - 36. Danchin A., *Placage et modèles totalitaires*, Actes du Colloque *Élaboration et justification des modèles, applications en biologie*, tome 1, Maloine, 1979, p. 44.

-
- 37. Danchin A., « Placage et modèles totalitaires », Actes du Colloque *Élaboration et justification des modèles, applications en biologie*, tome 1, Maloine, 1979, p. 45.
 - 38. Petitot J., *Discussion de la communication d'Antoine Danchin, Placage et modèles totalitaires*, Actes du Colloque *Élaboration et justification des modèles, applications en biologie*, tome 1, Maloine, 1979, p. 54.
 - 39. Petitot J., *Présentation, Colloque de Cerisy, Logos et Théorie des Catastrophes, à partir de l'œuvre de René Thom*, Patino, 1988, p. 47.

donc pas de découvrir des strates nouvelles du réel (de nouveaux objets) ce que réalise la science, mais elle rend intelligible la dynamique d'émergence des structures dans lesquelles les objets sont insérés. Rendre intelligible, c'est réduire l'immense variété des phénomènes apparents à une liste close et courte d'archétypes actanciels compatibles avec nos capacités sémiotiques. Au fond, la théorie des catastrophes est une épistémologie déterministe d'un nouveau genre, réhabilitant paradoxalement le langage naturel dans sa capacité d'intelligibilité du monde. Curieux va et vient : elle nous invite à nous départir du carcan sémantique pour apprendre à voir les singularités de formes au-delà de leurs incarnations substantielles puis à revenir au langage pour décrire leurs émergences.

Conclusions

Quelle sera la destinée de la pensée de Thom dans l'histoire des idées ? Il est possible qu'elle subsiste sous la forme d'une sorte de curiosité incongrue dans un mouvement épistémique contemporain dont l'orientation vers la rationalité quantitative, et bientôt exclusivement statistique, ne laisse guère de place aux conjectures. Dans ses applications en sciences physiques, la théorie des catastrophes est contrainte par son incapacité à la prédiction comme à la prise en compte des dimensions quantitatives, métriques, exactes. Mis à part quelques domaines, tels celui des caustiques en optique et des transitions de phase, elle n'a donc pas d'efficacité scientifique au sens de l'épistémè contemporain (prédiction, exactitude, réfutabilité). Cette inefficacité est une des sources de la désaffectation progressive de la théorie des catastrophes dans les sciences exactes bien que Thom ait explicité très clairement la scientificité de sa théorie. Pour lui, le statut scientifique de la théorie des catastrophes repose sur sa consistance mathématique, qui permet de faire des déductions, engendrant des formes nouvelles à partir d'un autre ensemble de formes, autorisant, en des cas favorables, des prédictions qualitatives, et réalisant en général une considérable réduction de l'arbitraire dans la

description⁴⁰. Dans les sciences humaines, la théorie des catastrophes s'est heurtée au septicisme et à la spécialisation disciplinaire qui voyait d'un mauvais oeil un mathématicien venir bouleverser les fondements de la linguistique, de la sociologie, de la psychologie. S'agit-il d'un échec global et la théorie des catastrophes est-elle vouée à disparaître dans l'enfer des idées mortes ou s'agit-il d'un éloignement momentané ? Au fond, il reste une incertitude. La théorie des catastrophes de René Thom est-elle la formalisation mathématique d'une intuition ontologique à laquelle on attribue des propriétés génériques qui permettent de la prolonger ou bien la théorie des catastrophes est-elle une investigation mathématique découvrant de nouveaux objets du réel (les singularités) précédemment cachés ? L'ambiguïté entre ces deux alternatives est difficilement évitable dès lors que l'on se met à penser en termes de théorie des catastrophes. Au delà de cette incertitude, l'apport fondamental, durable, de la pensée de René Thom, sera l'invitation à renouer avec le plaisir de la pensée, avec la conception de modèles, avec la recherche de la signification par la création d'espaces conceptuels dans lequel nous pouvons plonger nos objets d'études et étudier leurs déploiements virtuels. Prédire n'est pas expliquer, et expliquer c'est d'abord inventer⁴¹. Enfin, il est possible qu'il existe dans l'histoire des idées, c'est-à-dire au fond dans l'Homme, quelque chose qui s'oppose activement à la compréhension du continu et au contraire valorise la construction d'un référentiel quantitatif où les processus rationnels logiques peuvent se déployer. Aujourd'hui, nous assistons à une mutation culturelle et épistémologique profonde avec l'avènement de l'ère numérique et la construction d'une strate nouvelle de réalité, celle de la discrétisation binaire. Les déformations continues, les émergences des catastrophes, les prégnances et les saillances dessinent un paysage devenu incongru dans l'épistémé actuel. L'oubli possible de la pensée

40. Thom R., *Apologie du Logos*, « Théorie des catastrophes, état présent et perspectives, réponse à la réplique de E.C. Zeeman », Hachette, 1990, p. 364.

41. Thom cite souvent Paul Valéry : « On a toujours cherché des explications, quand c'est des représentations qu'on pouvait seulement essayer d'inventer », Valéry P., *Cahiers*, La Pléiade, I, Gallimard, p. 829. Cf. aussi Thom R., *Esquisse d'une sémiophysique*, Physique aristotélicienne et théorie des catastrophes, InterEditions, Paris, 1988, p. 151.

de René Thom, que nous ne pouvons imaginer sans tristesse, signerait la décadence d'une pensée collective s'enivrant à la coupe de l'illusion quantitative jusqu'à la perte du sens.

Références

- D'Arcy Wenworth Thompson, *On Growth and Form*, 1917, 1942, The Complete Revised Edition, Dover, 1992, traduction abrégée, 1994.
- Danchin A., « Placage et modèles totalitaires », Actes du Colloque *Élaboration et justification des modèles, applications en biologie*, tome 1, Maloine, 1979.
- Delattre P., article « Fonction », *Encyclopédia Universalis*.
- Deleuze G., « À quoi reconnaît-on le structuralisme ? », dans *Histoire de la philosophie*, sous la direction de François Chatelet, Le XX^{ème} siècle, Hachette littérature, 1973.
- Deleuze G., *Différence et répétition*, Paris, Presses Universitaires de France, 1968.
- Deleuze G., *Le pli*, Éditions de Minuit, 1988.
- Lacan J., *Écrits*, Le Seuil, 1966.
- Lamarck, *Philosophie zoologique*, 1809, Garnier Flammarion, 1994.
- Largeault J., Préface à *Apologie du logos*, René Thom, Hachette, 1990.
- Lévi-Strauss C., *Séminaire L'identité*, 1977, Puf, 1983.
- Morier CL., Thollot L., « De Julien Freund à René Thom, Vers le processus morphologique de la dynamique conflictuelle », *Stratégie*, N° 11, ISC, 2015.
- Peirce C.S., *Écrits sur le signe*, Rassemblés, traduits et commentés par G. Deledalle, Paris, Éditions du Seuil, 1978.
- Petitot J., « Psychanalyse et logique, plaidoyer pour l'impossible », *Confrontation*, René Major, journées de mai, 1980.
- Petitot J., *Les catastrophes de la parole*, Maloine, 1984.
- Petitot J., *Physique du sens, de la théorie des singularités aux structures sémio-narratives*, Editions du CNRS, 1992.
- Petitot J., « Identité et catastrophes, Topologie de la différence », in *L'identité*, Séminaire dirigé par Claude Lévi-Strauss, Puf, 1977, 1995.
- Petitot J., article « Forme », *Encyclopaedia Universalis*, 1995.
- Petitot J., « La généalogie morphologique du structuralisme », Claude Lévi-Strauss, *Critique*, Tome LV., N° 620-621, Janvier Février 1999.
- Petitot J., *Neurogéométrie de la vision, Modèles mathématiques et physiques des architectures fonctionnelles*, Les éditions de l'école polytechnique, 2008.
- Prochiantz A., « D'Arcy Thompson, zoologiste géomètre », Avant-propos à *Forme et croissance*, D'Arcy Thompson, 1961, 1992, Éditions du Seuil, Éditions du CNRS, 1994.
- Racine, *Andromaque*, La Pléiade, Gallimard, 1999.
- Sussmann H.J., Zahler R.S., « Catastrophe theory, as applied to the social and biological sciences : a critique », *Synthese*, 37, 1978.
- Tesnière L., *Éléments de syntaxe structurale*, Klincksieck, Paris, 1982.
- Thom R., « Topological Models in Biology », in *Topology*, vol. VIII, 1968.
- Thom R., « Topologie et signification », in *L'Âge de la science*, no 4, Dunod, Paris, 1968.
- Thom R., « Une théorie dynamique de la morphogénèse », in C.H. Waddington dir., *Towards a Theoretical Biology*, vol. 1, Edinburgh University Press, 1968.
- Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, deuxième édition, Interéditions, Paris, 1977.
- Thom R., *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, 1966, Christian Bourgeois éditeurs, 1980.
- Thom R., *Paraboles et catastrophes*, 1980, Flammarion, 1983.
- Thom R., *Esquisse d'une sémiophysique*, Physique aristotélécienne et théorie des catastrophes, InterEditions, Paris, 1988.
- Thom R., *Apologie du logos*, Hachette, 1990.
- Thom R., « Saillance et prégnance », *L'inconscient et la science*, Dunod, 1991.
- Thom R., *Prédire n'est pas expliquer*, ESHEL, 1991.
- Thom R., *Œuvres complètes*, CD-ROM, IHESS, 2003.
- Valéry P., *Essais quasi politiques*, Variété, Œuvres I, La Pléiade, 1957.
- Virole B. et coll., *Psychologie de la surdité*, De Boeck, Editions, Bruxelles, 1996 ; deuxième édition 2000, troisième édition 2006.
- Yau S., *Création gestuelle et débuts du langage*, CNRS, École des Hautes Études en Sciences Sociales, Éditions, langage croisé, 1992.

Zeeman E. C., *Catastrophe machine* in *Towards a Theoretical Biology*, Edinburgh University Press, Edinburgh, 1972.

Zeeman E.C., *Catastrophe Theory, Selected Papers*, 1972-1977, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading (Mass.), 1977

Zeeman E. C., *Selected papers*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1977.

Pour citer ce texte :

Les catastrophes de l'inconscient, Baghera, 2019, pp. 11-46.

<https://virole.pagesperso-orange.fr/PresThom.pdf>