

Attracteur (étrange) et architecture
Potentialité et application à l'architecture :
l'édifice attracteur ?

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture - Paris Malaquais

R9 - Digital Knowledge : La connaissance computationnelle

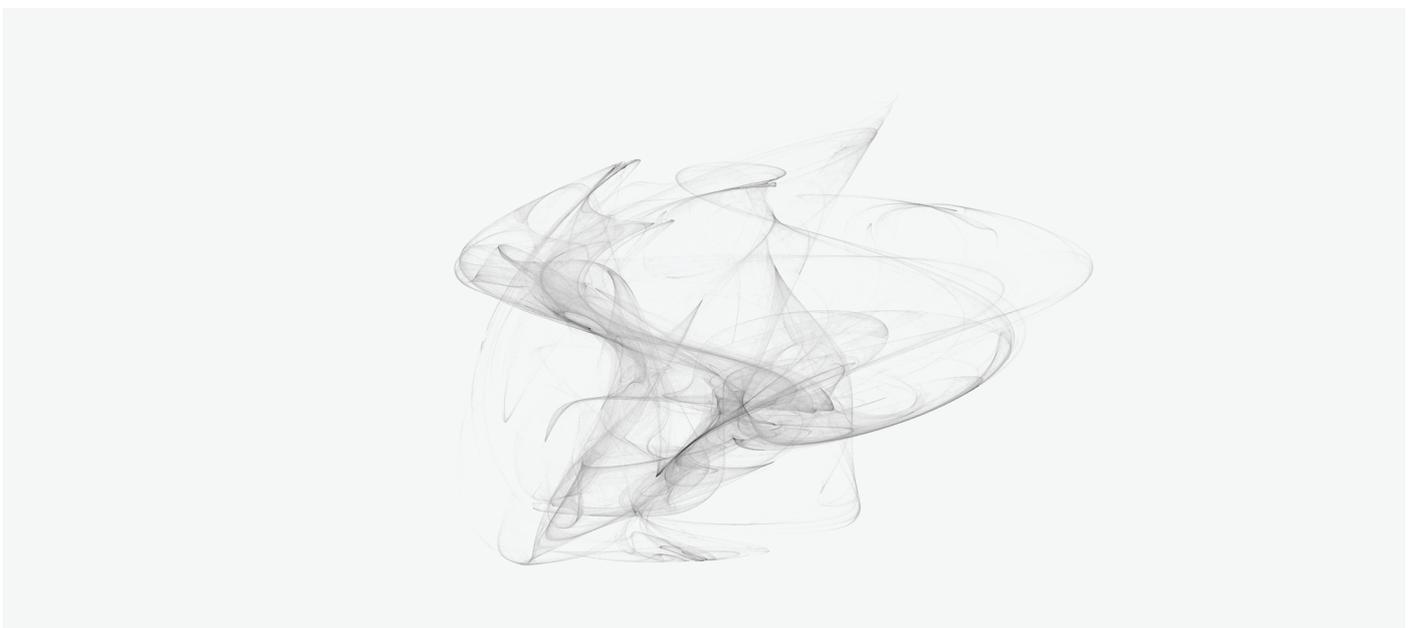
Sous la direction de: Christian Girard

Etudiant : Xavier Delanoue

Année : 2013-2014

Master 2

Illustration:



Attracteur de Pickover

$$\dot{x} = \sin ay - z \cos bx$$

$$\dot{y} = z \sin cx - \cos dy$$

$$\dot{z} = \sin x$$

Pour les paramètres:

$$a=2.129$$

$$b=1.539$$

$$c=1.432$$

$$d=1.377$$

Image produite à l'aide du logiciel Chaoscope

Attracteurs (étranges) & Architecture

Potentialité et application à l'architecture : l'édifice attracteur ?

QUESTIONS TRAITÉES DANS LA RECHERCHE

Question 1 : Qu'est-ce qu'un attracteur (étrange)?

- Sous-question 1.1 Comment la découverte des attracteurs a-t-elle changé notre compréhension de l'univers ainsi que celle de la physique ? Quel est le lien entre les attracteurs étranges et la théorie du chaos ?

(Mots clés associés : chaos (chance/ complexité/ création/ dynamisme/ évolutionnaire/ global/ indétermination/ instable/ ouvert/ ordre/ temps))

- Sous-question 1.2 Comment représenter un attracteur étrange ? Comment matérialiser un objet fractal en mouvement? Quelles formules mathématiques définissent un attracteur étrange ? Quels sont les paramètres d'un tel système ? Quels exemples d'attracteurs peut-on trouver dans la nature ?

(Mots clés associés : Géométrie (Animation/ auto similitude/ déploiement/ élastique/ assemblage/ forme/ fractal/ fragile/ hypertrophie/ informel/ mailles/ non formel/ séquence/ topologie/ trajectoire/ zoom))

- Sous-question 1.3 Comment l'irréversibilité joue-t-elle un rôle constructif pour les systèmes dissipatifs loin de l'équilibre? Comment la présence d'un attracteur conditionne-t-elle l'évolution d'un système dissipatif ? Comment un système dissipatif auto-organise-t-il sa propre structure interne ?

(Mots clés associés : auto-organisation (Attracteur/ bifurcation/ catalyseur/ condition/ dissipation/ entropie/ équilibre/ rapport/ spontanée))

Question 2 : Quelles potentialités l'architecte peut-il tirer de la compréhension des attracteurs ?

- Sous-question 2.1 Comment utiliser la nature fractale des attracteurs étranges ? A quelle échelle travailler les attracteurs étranges ?

(Mots clés associés : fractal (sans échelle /limite /dissolution /hasard /autosimilitude /indétermination/ ascalarité))

- Sous-question 2.2 Quelles caractéristiques les différents types d'attracteurs possèdent-ils ? Comment utiliser les attracteurs étranges dans processus de génération de forme ?

(Mot clé associé : attracteur (hasard /chaos/ itération))

- Sous-question 2.3 Comment permettre que « l'édifice attracteur » garde la même sensibilité aux conditions initiales que son pendant computationnel ? Quelle matérialité donner aux attracteurs étranges?

(Mot clé associé : Dynamisme (Action/ activation/ activité/ animation/ avancée/ avatar/ champ/ disposition/ environnement/ génétique de la forme/ instable/ inquiétude/ intelligence))

Attracteur étrange et architecture

Introduction	3
Compréhension des attracteurs (étranges)	4
Des attracteurs simples aux attracteurs étranges	4
L’auto-organisation et l’étude des structures dissipatives dans la thermodynamique	5
L’attracteur de Lorenz	9
Against self-organization: “Vers une esthétique de décision”	14
Application des attracteurs (étranges) à l’architecture	17
Une architecture complexe et non linéaire	17
Les attracteurs (étranges) comme générateurs de projets	23
Vers un bâtiment attracteur ?	29
De nouveaux comportements de la matière	30
Conclusion : vers un nouvel usage des attracteurs	36
Annexes	38
Hypothèses de travail.....	38
Sources bibliographiques.....	39
Mots-clés de la recherche	41
Exemples d’attracteurs étranges.....	43
.....	44

Introduction

La thermodynamique est l'étude des grands systèmes en équilibre. On peut la définir comme la science de tous les phénomènes qui dépendent de la température et de ses changements. Ilya Prigogine physicien et chimiste belge, distingue en 1979 dans son livre *la nouvelle alliance*¹ avec Isabelle Stengers philosophe et chimiste belge, trois états des systèmes en thermodynamique: "en équilibre", "proche de l'équilibre" et "loin de l'équilibre". Un système est dit « en équilibre » lorsque son niveau d'entropie est au minimum, l'entropie étant le degré de désordre d'un système par lequel il y a création de matière. Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec l'augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et celle du milieu extérieur. Pour les systèmes loin de l'équilibre, quand le niveau d'entropie atteint son niveau maximum, la matière se réorganise spontanément. Ce passage du désordre à l'ordre résulte de l'auto-organisation du système. L'auto-organisation d'un système est le phénomène de mise en ordre croissant par dissipation d'énergie allant en sens inverse de l'augmentation d'entropie. De ce passage, un nouvel état dynamique de la matière peut provenir. Cet état reflète l'interaction d'un système donné avec son environnement par dissipation d'énergie. Prigogine appelle ces structures *structures dissipatives* car elles requièrent plus d'énergie pour les soutenir.

Les attracteurs étranges sont des structures dissipatives qui constituent l'état d'équilibre thermodynamique. Le système ne dépendra plus que d'un nombre réduit de paramètres observables, telles que la température et la pression. D'une même formule mathématique, les attracteurs étranges permettent une infinité de solutions. Les formes produites par ces équations provoquent la fascination par leurs diversités et les éléments qu'elles nous évoquent. En partant d'une compréhension de ce phénomène et de l'étude approfondie de toutes les potentialités et limites que peuvent engendrer les attracteurs, comment l'architecte peut-il les introduire dans un processus de conception d'architecture computationnelle expérimentale?

La première partie de ce mémoire synthétise la connaissance sur les attracteurs simples et étranges. La deuxième partie, en se fondant sur des exemples de projets réalisés à l'aide d'attracteurs (étranges ou non), traite de l'application des attracteurs étranges à l'architecture.

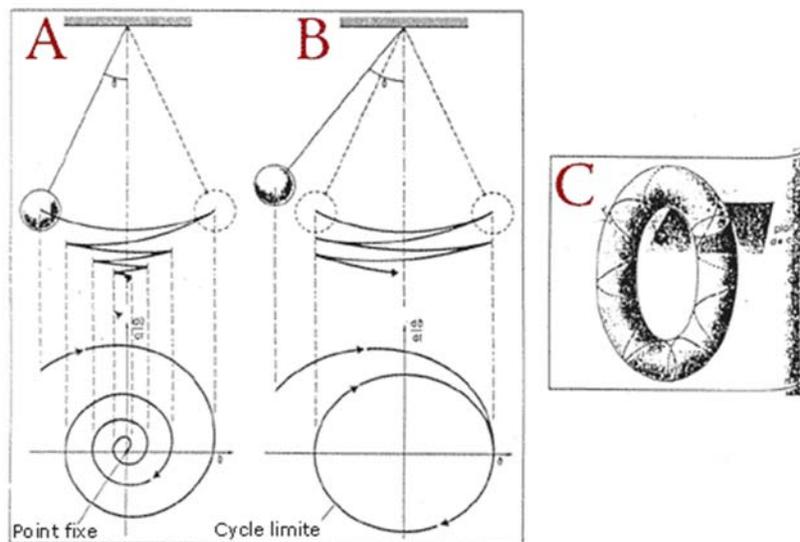
¹ Prigogine (I) ; Stengers, (I).- *La nouvelle alliance*. (Paris, Gallimard, Folio Essais, numéro 26, 1986, première édition 1979).

Compréhension des attracteurs (étranges)

Des attracteurs simples aux attracteurs étranges

La notion d'attracteur simple est une notion bien connue en physique. On peut trouver de nombreux exemples d'attracteurs simples dans notre vie quotidienne, par exemple un liquide chaud qui atteint la même température que son environnement gagne son état attracteur. La notion d'attracteur étrange, apparue dans les années 60, est quant à elle plus complexe et fait partie de la théorie du chaos. Pour la science classique, le chaos est produit aléatoirement car la complexité des résultats ne permet pas d'en dégager un ordre. La découverte des attracteurs étranges change cette perception du chaos en démontrant qu'après un certain temps un système attiré par un attracteur suit des règles, « *Chaotic processes are not random; they follow rules, but even simple rules can produce extreme complexity*². »

Il y a trois différents types d'attracteurs simples : ponctuel, cyclique et torique. L'attracteur ponctuel est composé d'un point fixe. Un pendule qui s'arrête à sa position initiale suite à un temps très long, retrouve sa position d'attracteur. L'attracteur est donc le point d'équilibre où s'arrête le pendule. L'attracteur ponctuel est celui qui se rapproche le plus de l'usage que les architectes et les étudiants en architecture font majoritairement des attracteurs dans des logiciels comme Grasshopper³ (ce point sera traité plus tard). Pour l'attracteur cyclique (ou de cycle limite), imaginons le même pendule que précédemment mais avec des oscillations entretenues. Les oscillations du pendule ne tendent plus alors vers un point mais vers un cycle qui représente les différentes positions prises par le pendule lors d'une oscillation. Pour finir, l'attracteur torique représente le mouvement et le résultat de deux oscillations indépendantes dont les trajectoires s'enroulent autour d'un tore.



Les différents types d'attracteurs simples :
 A : attracteur ponctuel B : attracteur cyclique C : attracteur torique⁴

² SPROTT, (J. C.) Strange Attractors: Creating Patterns in Chaos. New York: Henry Holt, 1993a.p7

³ <http://www.grasshopper3d.com/> consulté le 12/01/2013

⁴ DuboisM., Atten P., Bergé P., 1987, p. 194 issue de <http://www.societe-psychanalytique-de-paris.net/wp/transitions-dans-les-structures-psychiques-a-la-lumiere-de-la-theorie-du-chaos-deterministe/>

La découverte des attracteurs étranges dans les années 1960 a permis de représenter et d'analyser plus facilement des systèmes complexes. Le développement des ordinateurs a permis la représentation de ces objets mathématiques abstraits. Ils sont formés d'une suite de points : $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$ qui dépendent de la valeur initiale x_0 . La forme d'un attracteur étrange n'est ni une courbe, ni une surface, ni continue, elle est constituée d'un ensemble dense de points avec des espaces inoccupés entre eux. Les attracteurs étranges obéissent à un ordre de type chaotique déterministe car sensibles aux conditions initiales (une infime variation des conditions entraîne de grandes variations du système), « *Dans toute région, aussi petite soit-elle, occupée par l'attracteur fractal, passent autant de trajectoires que l'on veut, et chacune de ces trajectoires connaît un destin différent des autres. En conséquence, des situations initiales aussi voisines que l'on veut peuvent engendrer des évolutions divergentes.* »⁵.

L'auto-organisation et l'étude des structures dissipatives dans la thermodynamique

Le temps avec l'auto-organisation, est l'une des notions importantes qu'introduit la thermodynamique dans l'étude des grands systèmes, « *La physique, aujourd'hui, ne nie plus le temps. Elle reconnaît le temps irréversible des évolutions vers l'équilibre [...].* »⁶. Newton considérait le temps comme une valeur répétable. Pour la physique newtonienne, chaque moment est équivalent au précédent comme au suivant. Le deuxième principe de la thermodynamique (également connu sous le nom de deuxième loi de la thermodynamique ou principe de Carnot) établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques. Ce phénomène est décrit par la loi de Fourier pour qui la conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse. Ilya Prigogine décrit la loi de Fourier comme l'une des premières démonstrations de l'irréversibilité d'un phénomène, « *La loi de Fourier décrit un processus spontané – la chaleur se répand –, elle ne donne pas le moyen de l'annuler ou l'inverser, bref de le contrôler.* »⁷. Cette irréversibilité est liée au fait qu'à l'inverse de la physique newtonienne, la thermodynamique considère que chaque moment est indépendant du suivant. La réversibilité des phénomènes n'est applicable qu'aux systèmes fermés qui ne composent qu'une petite partie de l'univers alors que l'irréversibilité s'applique à tout le reste de l'univers. Pour Prigogine, l'irréversibilité jouerait dans les systèmes loin de l'équilibre un rôle constructif, « *La thermodynamique des processus irréversibles a découvert que les flux qui traversent certains systèmes physico-chimiques et les éloignent de l'équilibre, peuvent nourrir des phénomènes d'auto-organisation spontanée, des ruptures de symétrie, des évolutions vers une complexité et une diversité croissantes. Là où s'arrêtent les lois générales de la thermodynamique peut se révéler le rôle constructif de l'irréversibilité ; c'est le domaine où les choses naissent et meurent, ou se transforment en une histoire singulière que tissent le hasard des fluctuations et la nécessité des lois.* »⁸.

⁵ Sperber (F) ; Paris (R).- *Qu'est ce que un attracteur étrange ?* in <http://www.matierevolution.fr/spip.php?article706> citant Prigogine (I) ; Stengers (I).- *Entre le temps et l'éternité* (Paris, Flammarion : Champs Sciences, 262, 2009) consulté le 03/06/2013

⁶ Prigogine (I) ; Stengers, (I).- *La nouvelle alliance.* (Paris, Gallimard, Folio Essais, numéro 26, 1986, première édition 1979) p366

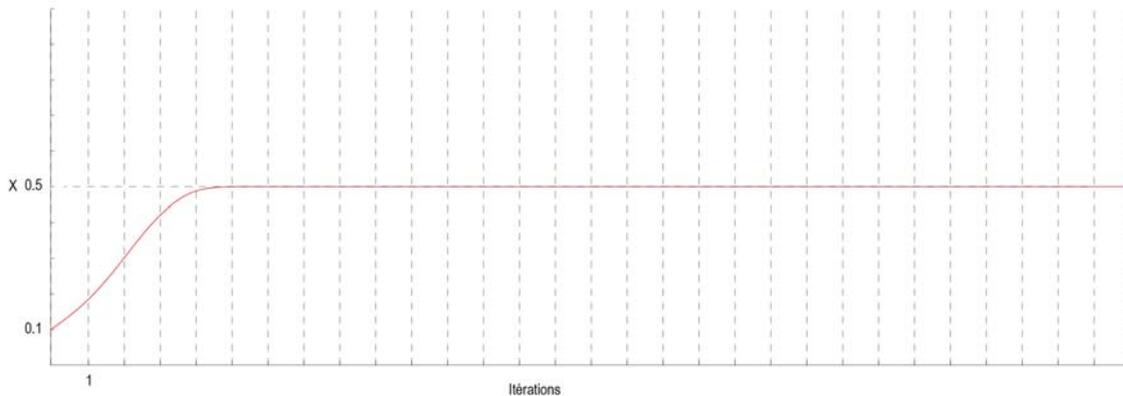
⁷ Ibid p359

⁸ Ibid

Pour expliquer les différentes caractéristiques des attracteurs étranges, nous allons réaliser un exercice proposé par Julien Sprott dans son livre *Strange Attractors: Creating Patterns in Chaos*⁹. Dans cet exercice, Sprott propose de résoudre l'équation logistique suivante (écrite ici sous sa forme discrète) :

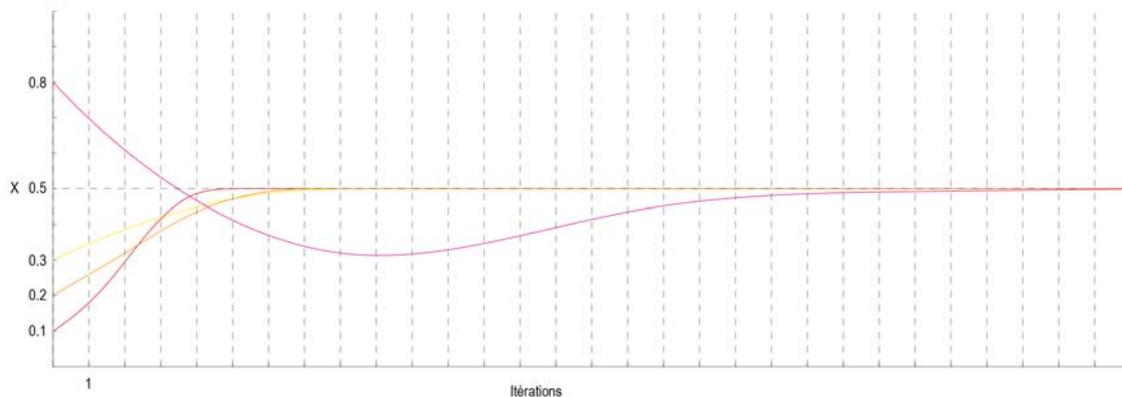
$$X_{n+1} = RX_n(1-X_n)$$

Les équations logistiques ont été mises en évidence par Pierre François Verhulst en 1840 et servent à étudier la dynamique des populations. Elles s'opposent aux modèles d'études linéaires où la croissance des populations est exponentielle. Leurs trajectoires ne sont pas représentées par des droites comme pour des systèmes linéaires, mais par des courbes avec différents points d'inflexions. Dans l'équation ci-dessus, R représente le taux de croissance maximale de la population, et X_n représente la valeur du paramètre au temps n . Résolvons l'équation pour $R=2$, $X_0=0.1$ et pour 20 itérations (c'est-à-dire pour le nombre de fois où on va répéter le calcul). Les résultats de l'équation sont représentés graphiquement ci-dessous¹⁰ :



Résolution graphique de l'équation $X_{n+1} = 2X_n(1-X_n)$ avec $X_0=0.1$ et pour 20 itérations

Sur le graphique ci-dessus nous pouvons voir que la courbe monte puis stagne vers 0.5. 0.5 représente le point fixe de l'équation, il peut être aussi appelé point attracteur. Toutes les valeurs de X comprises entre 0 et 1 seront attirées par ce point. Le domaine des valeurs comprises entre $X=0$ et $X=1$ est appelé bassin d'attraction. Toutes les trajectoires comprises dans ce bassin seront attirées par le point attracteur. Ainsi en la présence d'un attracteur, les équations qui exhibent des solutions chaotiques sont instables mais bornées. Résolvons maintenant l'équation pour différentes valeurs de X et pour $R=2$:



Résolution graphique de l'équation $X_{n+1} = 2X_n(1-X_n)$ avec en rouge $X_0=0.1$, en orange $X_0=0.2$, en jaune $X_0=0.3$ et en magenta $X_0=0.8$ et pour 20 itérations

⁹ Sprott, (J. C.) *Strange Attractors: Creating Patterns in Chaos*. New York: Henry Holt, 1993a.

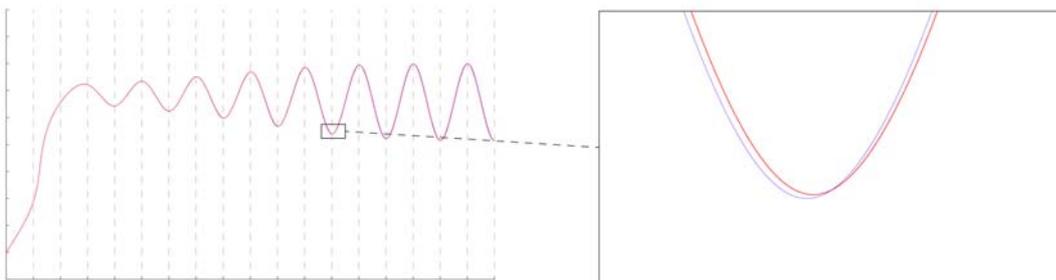
¹⁰ Tous les graphiques produits ont été réalisés sur gasshopper

Itérations\X	0,1	0,2	0,3	0,8
0	0.1	0.2	0.3	0.8
1	0.18	0.32	0.42	0.32
2	0.2952	0.4352	0.4872	0.4352
3	0.416114	0.491602	0.499672	0.491602
4	0.485926	0.499859	0.5	0.499859
5	0.499604	0.5	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5

Tableau compilant l'ensemble des résultats de l'équation précédente pour différentes valeurs de X et pour R=2

Pour différentes valeurs de X, on voit sur le graphique précédant que toutes les trajectoires sont attirées par le point attracteur. Après quelques itérations, elles arrivent toutes vers une région d'états stables. Cette première expérience permet de mettre en évidence la présence d'un point attracteur et de l'évolution des systèmes en la présence d'un attracteur vers leurs états d'équilibres.

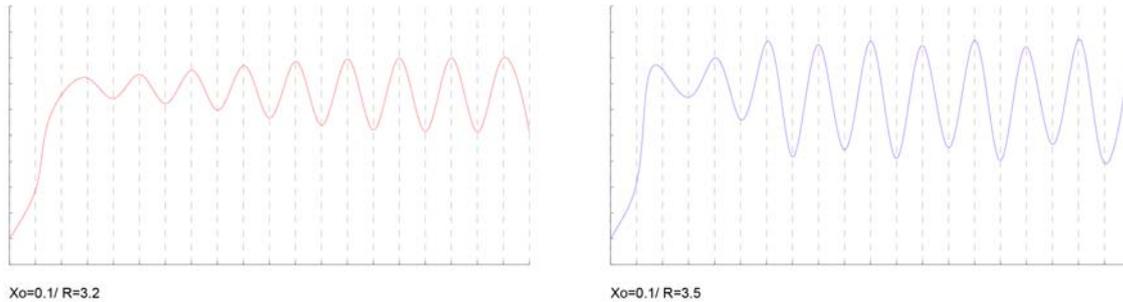
En thermodynamique, les systèmes soumis à des attracteurs étranges sont des structures dissipatives productrices d'entropie. Avant la découverte des attracteurs étranges, tous les systèmes soumis à un attracteur simple devaient se ressembler, c'est-à-dire que la présence d'un attracteur conditionnait l'évolution du système. Ces évolutions étaient prévisibles et répétables. Pour un attracteur donné, le système évoluera toujours de la même façon. Avec la thermodynamique et les systèmes dissipatifs, la notion d'attracteur renvoie à la diversité car les systèmes interagissent avec leurs environnements, « un pendule idéal, sans frottement, n'a pas d'état attracteur, mais poursuit indéfiniment son mouvement d'oscillation. En revanche, le mouvement d'un pendule réel s'amortit progressivement »¹¹. Le mouvement d'un pendule réel s'amortit progressivement car il dissipe de l'énergie en réaction aux forces de frottement. Cette dissipation d'énergie correspond à la diminution d'entropie du système. Ainsi quand le niveau d'entropie est le plus faible, le pendule s'arrête à son point d'équilibre. L'évolution du système dépend alors des conditions initiales. Si les conditions initiales appliquées au système changent, l'évolution de celui-ci changera elle aussi. Reprenons la même équation que précédemment mais pour une valeur de R différente (R=3.2) :



Sensibilité aux conditions initiales d'un système soumis à un attracteur : représentation de l'équation $X_{n+1}=R \cdot X_n(1-X_n)$ avec $R=3.2$ et pour 50 itérations, en bleu avec $X_0=0.1$, en rouge avec $X_0=0.10001$

¹¹ <http://www.matierevolution.fr/spip.php?article706> citant PRIGOGINE, Ilia et Isabelle STENGERS, *Entre le temps et l'éternité*, Paris, Flammarion, Coll. Champs, 1992, consulté le 03/06/2013

Sur le graphique précédent, on observe que pour une même équation mais avec une infime variation des conditions initiales (entre $x_0=0.1$ et $x_0=0.10001$) la trajectoire prise par le système varie. Toute perturbation modifie l'évolution d'un système d'une manière irréversible. Les attracteurs représentent l'état d'émergence d'organisation au sein d'un système. Sur les graphiques ci-dessous, les systèmes sont soumis à un attracteur cyclique de période 2 (à gauche) et de période 4 (à droite).



Graphique montrant l'auto-organisation d'un système en présence d'un attracteur pour l'équation $X_{n+1}=R \cdot X_n(1-X_n)$

Sur les graphiques ci-dessus, les trajectoires des systèmes sont représentées par des courbes qui se répètent en fonction de la période de l'attracteur. On aperçoit que les systèmes après un certain temps commencent à s'auto-organiser progressivement. L'auto-organisation d'un système est le passage d'un espace d'états très large vers une région plus petite d'états plus stable sous le seul contrôle du système lui-même. Sur le graphique de gauche, on peut voir que le système migre vers une région d'états plus stable comprise entre 0.5 et 0.8, qui correspondent à l'état attracteur du système. Cet état représente l'état préférentiel du système. L'état attracteur ou d'équilibre est l'état dans lequel un système ne subit pas de changement. Pour l'équation précédente et pour $R=2$, cet état est défini par :

$$X_{n+1}=X_n$$

En présence d'un attracteur, le système aura tendance à évoluer vers cet état et même s'il subit une perturbation il y retournera. Dans tous les cas, en présence d'un attracteur le système met en œuvre une dynamique propre à lui-même lui permettant de retrouver un état stable. L'auto-organisation se fait donc indépendamment des conditions extérieures, « *Sourd et aveugle à quelque monde extérieur que ce soit, le système fonctionne seul et tous ses états se valent.* »¹².

¹² Prigogine (I) ; Stengers, (I).- La nouvelle alliance, op cit., p356

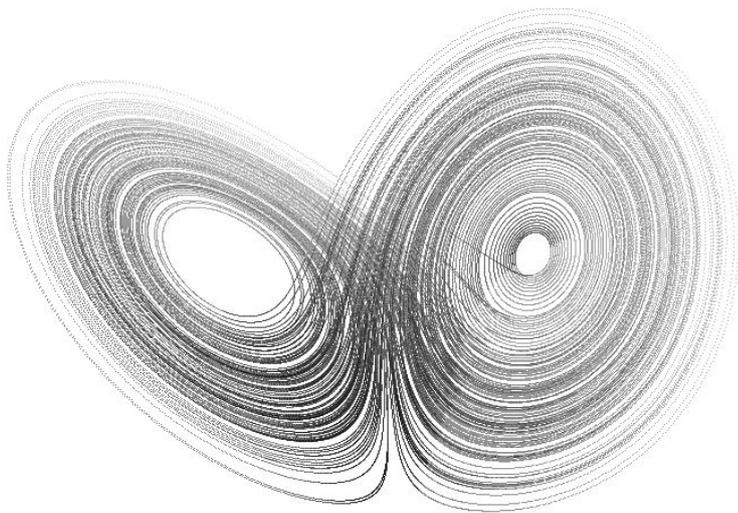
L'attracteur de Lorenz

L'attracteur de Lorenz a été découvert par Edward Lorenz au début des années 60, lorsque celui-ci étudiait le mouvement d'un gaz ou d'un liquide sous l'effet de la chaleur. Il publia sa découverte en 1963 dans un article intitulé *Deterministic Nonperiodic Flow*¹³. Le titre de l'article est une définition de ce que nous appelons aujourd'hui *chaos*. Dans cet article, Lorenz énonce les différentes caractéristiques des attracteurs étranges tel que la sensibilité aux conditions initiales et leur représentation dans un espace limité appelé « espace des phases ». Lorenz découvrit son attracteur en développant un modèle composé d'un grand nombre d'équations différentielles qu'il résolvait à l'aide d'un ordinateur. En simplifiant ces équations et pour de mêmes conditions initiales, les solutions évoluaient différemment dans le temps. Cependant elles respectaient toutes une même topologie. Cette topologie est le résultat de l'étirement et de la torsion d'une boucle simple.

L'attracteur de Lorenz est le résultat des équations différentielles suivantes pour les conditions initiales $\sigma = 28$, $r = 10$ et $b = 8/3$:

$$\begin{aligned} X' &= \sigma(Y - X) \\ Y' &= -XZ + rX - Y \\ Z' &= XY - bZ \end{aligned}$$

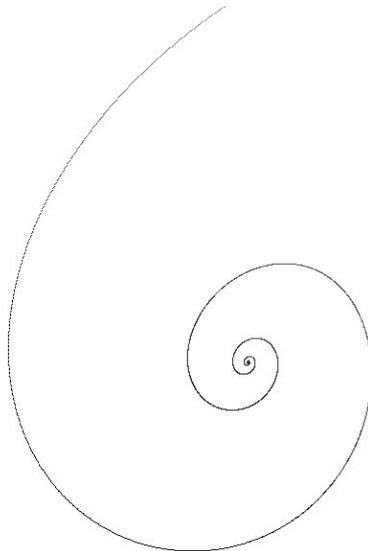
En mathématique, une équation différentielle exprime la relation entre une ou plusieurs fonctions inconnues et leurs dérivées. Les solutions sont dites numériques en opposition aux solutions analytiques. Pour des équations différentielles de systèmes chaotiques, les solutions numériques permettent une approximation des trajectoires prises par le système. Ainsi les équations ne seront pas résolues d'une manière exacte car cela nécessiterait un nombre d'itération infinie. Les résultats obtenus sont donc des approximations dont on essaie de réduire les erreurs en prenant un pas le plus petit possible.



Représentation de l'attracteur de Lorenz à l'aide du logiciel Chaoscope pour l'équation :

$$\begin{aligned} X' &= 10(Y - X) \\ Y' &= -XZ + 28X - Y \\ Z' &= XY - (8/3)Z \end{aligned}$$

¹³ Lorenz, Edward N., 1963: Deterministic Nonperiodic Flow. J. Atmos. Sci., 20, 130–14



Représentation de l'attracteur de Lorenz à l'aide du logiciel Chaoscope pour l'équation :

$$\begin{aligned} X' &= 10(Y - X) \\ Y' &= -XZ + 5X - Y \\ Z' &= XY - (8/3)Z \end{aligned}$$

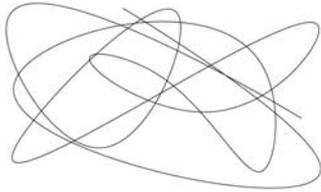
Les représentations des trajectoires des attracteurs simples ou étranges sont définies dans « l'espace des phases », qui « est un espace abstrait dont les coordonnées sont les variables dynamiques du système étudié.¹⁴ ». L'espace des phases permet de comparer la dépendance des solutions d'une équation aux conditions initiales. Si l'on considère différentes conditions initiales on aura différentes courbes dans cet espace. Prenons l'exemple des représentations que nous tenons de l'attracteur de Lorenz ci-dessus. En changeant le paramètre r de 28 à 5, pour le même instant t on obtient deux trajectoires extrêmement différentes.

Il y a trois différentes entités qui habitent l'espace des phases : la trajectoire du système, les attracteurs (qui représentent la tendance à long terme du système) et les bifurcations (qui sont l'émergence de nouvelles tendances). Un espace des phases contient autant de dimensions que le système possède de degrés de liberté. Le choix des degrés de liberté est très important pour la définition d'un espace des phases. Par exemple pour un four, le degré de liberté du système sera la température. L'espace des phases aura alors une seule dimension et le portrait des phases du système sera représenté par une ligne. Pour un pendule, les degrés de liberté du système seront sa vitesse et sa position. L'espace des phases aura alors deux dimensions et le portrait des phases du système sera représenté par un plan. Plus il y a de degrés de liberté, plus la représentation du système dans l'espace des phases sera complexe. Ces représentations contiennent en chaque point toute l'information nécessaire à l'étude du système. Quand le système évolue, le point dans l'espace des phases va lui aussi changer en décrivant une trajectoire. Comme nous l'avons vu précédemment, l'ensemble des points dont les trajectoires convergent vers l'attracteur forment un bassin d'attraction. Le centre du bassin d'attraction est occupé par le point attracteur qui représente l'état d'équilibre final vers lequel le système évolue.

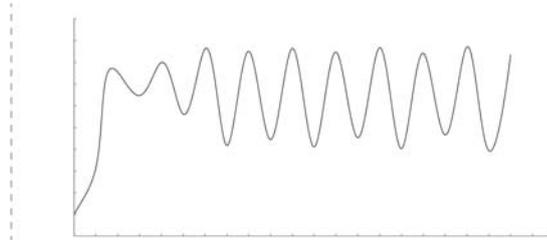
¹⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace_des_phases consulté le 12/01/2013

Si un espace des phases est composé d'un ou plusieurs attracteurs, la trajectoire qui représente les différentes séries d'états du système sera attirée par le point attracteur (singularité) et sera caractérisée par l'apparition d'une forme ordonnée. Si un espace des phases ne possède pas d'attracteur, la trajectoire qui représente les différents états du système errera sans but et sera complètement aléatoire et imprévisible.

Trajectoire:



Sans attracteur



Avec attracteur cyclique de période 4

A gauche : représentation de la trajectoire d'un système sans attracteur, la trajectoire erre sans ordre. A droite : représentation de la trajectoire du système avec un attracteur pour l'équation : $X_{n+1}=R*X_n(1-X_n)$ avec $R=3.5$ et $X_0=0.1$ pour 20 itérations. La trajectoire suit un ordre régulier et se répète selon la période de l'attracteur

En plus de ces dimensions un espace des phases est caractérisé par un certain nombre de paramètres. « Un processus donné peut avoir par exemple la température comme l'un de ses degrés de liberté cependant ce processus prendra place dans un environnement qui a lui aussi une température donnée. Cette température externe est incorporée dans le modèle comme un paramètre de contrôle. Les paramètres de contrôle peuvent servir de connections entre différents espaces de phases. Imaginons un espace de phase défini par 4 ou 5 points attracteurs ainsi que par un paramètre de contrôle qui fait évoluer le système d'un attracteur à un autre quand celui-ci change. Le système sera alors dans différents états d'équilibre pour différentes valeurs du paramètre. »¹⁵. Lorsque ces paramètres évoluent jusqu'au point critique, une bifurcation apparaît modifiant les attracteurs et entraînant l'auto-organisation du système, « Bifurcations are mutations that occur at critical points in the « balance of power » between physical forces - temperature, pressure, speed and so on – when new configuration become energetically possible, and matter spontaneously adopts them. »¹⁶.

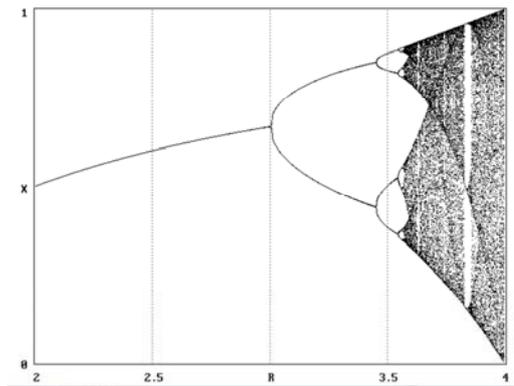


Diagramme de bifurcation pour l'équation logistique $X_{n+1}=R*X_n(1-X_n)$ ¹⁷

¹⁵ Delanda (M).- Material elegance, in Elegance, in Architectural Design Vol°77, n°1, (London, Architectural Design, Academy Press, 2007) Ali Rahim, Hina Jamelle, editors p22

¹⁶ DeLanda, (M.).- *Non organic life* Ibid., p135

¹⁷ Sprott, (J. C.) *Strange Attractors: Creating Patterns in Chaos*. Op cit p 12

Un diagramme de bifurcation donne la valeur de stabilité du système. Pour chaque valeur de R est reportée la valeur maximale de X_n , c'est-à-dire la valeur maximale avant le point attracteur. Une bifurcation se produit quand le système atteint un point critique lors du changement de rapport entre les différents taux. Les bifurcations permettent d'introduire plus de complexité dans un système. Suite à une bifurcation, un attracteur peut spontanément muter en un autre type d'attracteur. Par exemple, un attracteur de cycle limite peut se transformer en un attracteur étrange. Pour l'exemple précédent, lorsque la température atteint un point critique, la bifurcation produite change le système de bassin d'attraction, « *Lorsque sous l'influence d'un paramètre de contrôle, le potentiel lié à un attracteur s'accroît [...], le système est moins résistant, et la probabilité pour que les forces stochastiques lui fasse quitter le bassin d'attraction augmente.* »¹⁸. La nature instable des systèmes chaotiques et l'apparition de bifurcation permettent à un système de quitter son bassin d'attraction pour un autre. Lorsqu'un système change de bassin d'attraction suite à une bifurcation, il se réorganise sous l'influence du nouveau point attracteur.

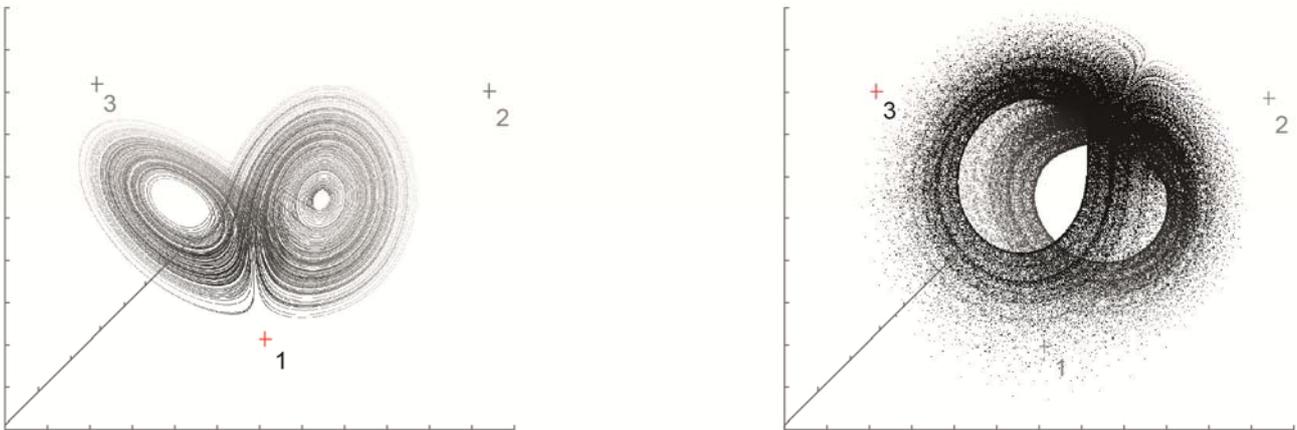


Schéma montrant les différents états d'un système dans un espace des phases à trois attracteurs. Le paramètre en variant change le système d'un attracteur à un autre

Dans *Material elegance*, Manuel DeLanda propose diverses expériences où les attracteurs par la relation entre différents espaces des phases sont utilisés comme systèmes pour générer des organismes simples qui reproduiraient différentes actions comme marcher/avoir faim/manger/avoir sommeil/ dormir, « *Imaginons une phase séparée habitée par un simple attracteur périodique mais qui est connectée aux paramètres du premier. Comme le second système se perpétue selon son propre état, il change la valeur du paramètre du premier système avec la conséquence que le système se répète via ses points attracteurs à l'infini. Ces deux espaces des phases peuvent modeler un organisme simple qui cycle via une série d'états (marcher/avoir faim/manger/ se sentir fatigué/dormir) tous les jours. Ces systèmes couplés sont appelés hiérarchiques et peuvent être rendus aussi complexes que l'on veut avec différents espaces de phases en série ou en parallèle et avec des transformations complexes à chaque niveau appelées bifurcations.* »¹⁹.

¹⁸ Delignières (D).-Système dynamique et morphogénèse in <http://didier.delignieres.perso.sfr.fr/> consulté le 01/11/2013

¹⁹ Delanda (M).- *Material elegance* op cit., p22

Système hiérarchique :

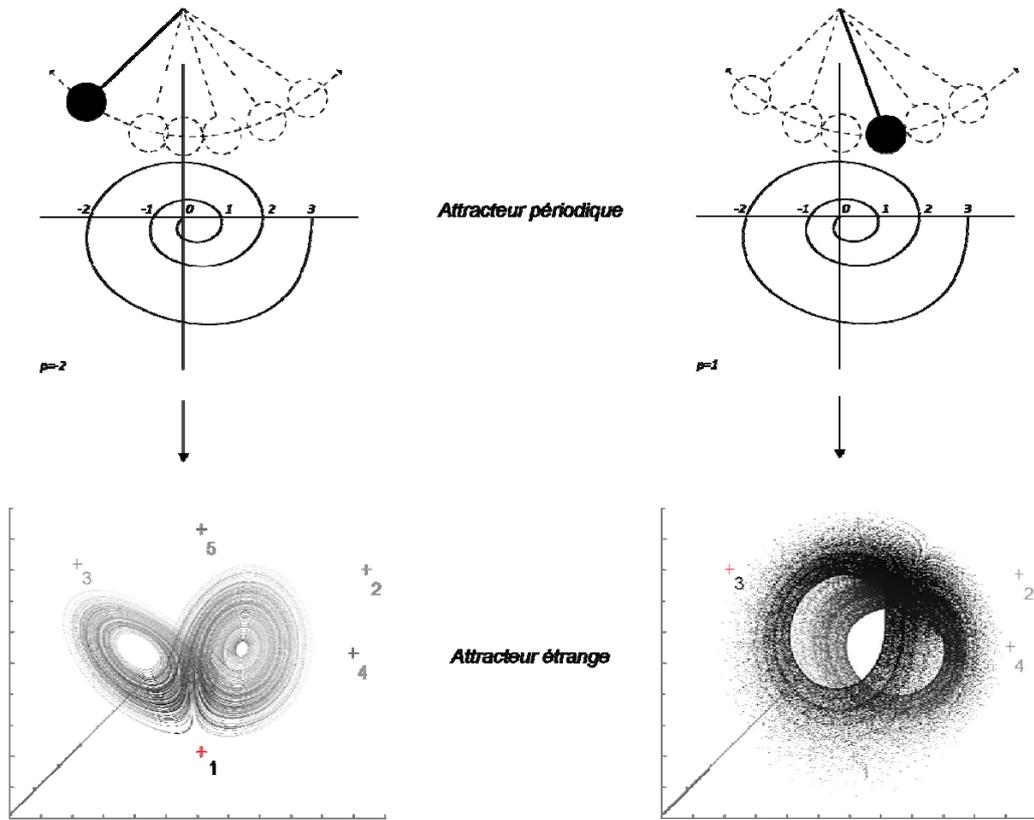


Schéma montrant deux espaces des phases séparés (dont l'un périodique avec un attracteur simple) mais connectés par un paramètre commun (par exemple la température). Le premier système (périodique) se répète via ses points attracteurs sur un temps très long (proche de l'infini) et prend 5 positions différentes. La variation des positions entraînent des bifurcations qui changent le second système de bassin d'attraction.

Against self-organization: “Vers une esthétique de décision”

Pour Prigogine, un système caractérisé par un attracteur étrange est capable de s'auto-organiser car chacun des points du système « *sait tout ce qu'il aura jamais à savoir, c'est-à-dire la distribution spatiale des masses et leurs vitesses* »²⁰. Cependant selon lui, il ne faut pas s'arrêter à ce raisonnement car cela signifierait que l'évolution de tous systèmes serait prévisible. En effet, cette omniscience ou la capacité que possède un système à prédire son évolution ne prend pas en compte le rapport qu'entretient le système avec des perturbations qui ne lui sont pas intrinsèques et qui pourtant en modifient fortement les caractéristiques. Prenons par exemple l'étude d'une prévision météorologique : à court terme, une analyse très fine des conditions permet de prévoir le temps qu'il fera. Cependant à long terme, il est beaucoup plus difficile de faire une prévision car un système évoluera différemment en fonction du rapport avec son environnement, « *since we can never know the initial conditions with perfect precision, long-term prediction is impossible, even when the physical laws are deterministic and exactly known* »²¹. Les attracteurs étranges sont donc des systèmes déterministes avec des évolutions imprévisibles. Ainsi quel contrôle possède un architecte sur ces trajectoires ?

Un système est dit déterministe lorsque l'on peut prévoir exactement son évolution. Le contrôle est alors total et à toutes les échelles. Cependant l'intérêt de travailler avec les attracteurs étranges, est de ne plus penser en terme de prévisibilité mais en terme de probabilité. Les attracteurs par leurs présences sont capables de générer un ordre spontané qui réduit le nombre de probabilité d'évolution d'un système. Un attracteur (même dans un espace des phases très grand) réduira toujours le nombre de solutions possibles. Ainsi le processus modélisé sera tout sauf aléatoire même si l'attracteur est divergent car ultra-sensible aux conditions initiales, « *Because these trajectories represent the behavior of real physical systems, the attractors and repellers in phase portrait represent the long-term tendencies of a system.* »²². Jose Sanchez dans l'introduction du projet du studio Plethora-Cluster 7 du master d'architecture de la Bartlett, cite le dernier paragraphe de « Against Self-Organization » de Steven Shaviro professeur de lettres à l'université de Détroit publié dans son blog *The Pinnocchio Theory* où il analyse le livre de Peter Ward *The Medea Hypothesis*²³ :

““Decisions are singular and unrepeatable; they cannot be generalized into rules. But all this also means that we cannot say that decision simply “emerges” out of a chaotic background, or pops out thanks to the movement from one “basin of attraction” to another. No self-organizing system can obviate the need for such a decision, or dictate what it will be. And decision always implies novelty or difference — in this way it is absolutely incompatible with notions of autopoiesis, homeostasis, or Spinoza’s conatus. What we need is an aesthetics of decision, instead of our current metaphysics of emergence.” Steven Shaviro”²⁴

²⁰Prigogine (I) ; Stengers, (I).- La nouvelle alliance, op cit., p355

²¹ Sprott, (J. C). Strange Attractors: Creating Patterns in Chaos. New York: Henry Holt, 1993a.p7

²² DeLanda, (M.).- *Non organic life*, in Zone 6: Incorporation, Jonathan Crary et Sanford Kwinter editors, 1992 p137

²³ Ward (P); *The Medea Hypothesis: Is Life on Earth Ultimately Self-Destructive?* Princeton, Princeton university press, 2009

²⁴ <http://www.plethora-project.com/studio/> consulté le 30/05/13

Dans *The Medea Hypothesis*, Ward expose une hypothèse très controversée remettant en cause l'hypothèse de Gaia selon laquelle la terre serait un système homéostatique, c'est-à-dire un système qui serait capable de conserver son état d'équilibre sans tenir compte des conditions extérieures. Pour Ward, l'hypothèse de Gaia ne prend pas en compte les mécanismes de retour d'informations (feedback) que subit continuellement la terre, un feedback étant la caractéristique d'un système dans lequel l'output (ou le résultat) influe sur l'input (ou l'entrée) pour en modifier son opération.

L'article de Shaviro ne remet pas en cause l'auto-organisation des systèmes, mais plutôt la valeur attribuée par les architectes, les scientifiques à ce processus, "*I think that we need to question our reflexive belief — or unwarranted expectation, if you prefer — that emergent or self-organizing phenomena are somehow always (or, at least, generally) for the best*"²⁵. Aujourd'hui on cherche à construire des machines autour du « self-learning » ou du « self-organizing » plutôt que d'établir des règles plus simples déterminées à l'avance. Shaviro conteste la théorie du philosophe britannique Alfred North Whitehead (1861-1947) selon laquelle chaque évènement dans l'univers induirait un certain moment de décision. Pour Whitehead, ce moment signifierait que la décision serait volontaire, tandis que pour Shaviro, chaque acte est une conséquence éloignée de la décision (selon le sens de Whitehead) plutôt que de la cause, « *decisions are singular and unrepeatable; they cannot be generalized into rules* »²⁶. La décision (au sens de Whitehead) pour Shaviro, implique toujours une nouveauté ou une différence. Ce raisonnement est similaire à celui de Prigogine sur l'irréversibilité du temps, où en fonction de l'action précédente, l'action suivante ne sera jamais identique. Chaque décision est singulière car la non-répétition du temps et l'introduction de feedback entraîne l'irréversibilité et l'imprévisibilité des phénomènes. Ainsi aucun système ne peut dicter ce qu'il sera. Pour Shaviro, ce que l'on a besoin est une esthétique de la décision, "*What we need is an aesthetics of decision, instead of our current metaphysics of emergence*"²⁷.

²⁵ <http://www.shaviro.com/Blog/?p=756> consulté le 30/05/13

²⁶ Ibid

²⁷ Ibid

L'espace des phases d'une majorité des systèmes thermodynamiques contient plus d'un attracteur. Cette multiplicité d'attracteurs entraîne donc un « choix » du système entre différentes évolutions. Ce panel de choix est source de créativité et de variabilité comme nous l'énonce Manuel DeLanda, « *When a system's dynamics are caught in a strange attractor (deterministic chaos), that system is « bound to be creative », that is, to explore all the possibilities of a small region of phase space.* »²⁸. Le « choix » intervient en la présence de plusieurs attracteurs. Le système évolue alors différemment en fonction du bassin d'attraction dans lequel il se situe. Ce « choix » est lié aux bifurcations qui entraînent l'apparition ou la modification d'attracteurs. Ainsi la notion de « choix » selon DeLanda est différente de la notion de « décision » selon Whitehead. Pour Whitehead la décision serait volontaire et impliquerait la conscience d'un système sur sa propre évolution. La vision de DeLanda se rapproche plus de celle de Shaviro où chaque décision est singulière et non répétable. Comme nous l'avons vu précédemment, les attracteurs représentent la tendance à long terme d'un système dont les bifurcations permettent d'en modifier l'évolution. Ainsi pour les attracteurs étranges, les « choix » ne sont pas répétables car l'action précédente est toujours différente de la suivante. Les attracteurs étranges sont donc imprévisibles, chaque changement dans les conditions initiales entraîne des bifurcations qui modifient d'une manière irréversible l'évolution du système. Cette liberté et spontanéité crée un répertoire formel infini. Pour autant, cela ne veut pas dire que l'architecte se dédouane de toute décision. Cette liberté permet au contraire à l'architecte de définir tous les paramètres du système. Les attracteurs étranges proposent donc une *esthétique de décision* car en fonction des paramètres définis par l'utilisateur, le système évoluera différemment. Une étude précise des paramètres permet de contrôler un système et de l'orienter vers une direction. Ainsi, il ne faut plus avoir la volonté de vouloir créer un système omniscient qui tend vers un optimum, mais prendre en compte l'imprévisibilité dans l'étude de ces objets.

L'esthétique de décision intervient donc dans le choix des paramètres et dans le choix de la forme « finale » produite. Cependant cette « forme finale » en architecture ne correspond qu'à l'arrêt à un instant t de l'évolution d'un système. Ce choix ne comporte aucune légitimité, il correspond à la sensibilité de l'architecte. Dans une interview publiée dans Log 28 Stocktaking²⁹, Patrik Schumacher (architecte travaillant avec Zaha Hadid) répond à une question posée par Peter Eisenman (architecte et théoricien américain figure du mouvement déconstructiviste) sur le *choix* que proposent les algorithmes. Pour Schumacher, l'architecte doit choisir à travers un ensemble de possibilité à l'aide de critères fonctionnels et esthétiques. On revient donc à une esthétique de décision où le choix est dicté par une sensibilité esthétique. Ces choix pour l'architecte sont intuitifs. Ce qui change radicalement, en comparaison avec des architectes ne travaillant pas avec des algorithmes, des attracteurs étranges ou tout autre procédés paramétriques dans leurs processus de conception, est l'ensemble des potentialités parmi lesquelles le choix intervient.

²⁸ Delanda, (M.).- *Non organic life*, op cit p139

²⁹ Interview de Patrik Schumacher par Peter Eisenman publié in Log 28 Stocktaking, New York anyone Corporation, Summer 2013 p39-52

Application des attracteurs (étranges) à l'architecture

Une architecture complexe et non linéaire

Evolutionary thermodynamics and complex system theory provide a potential scientific background for many other fields of application. The paradigm shift suggested by Prigogine is an opportunity to ask new question and define an approach for understanding nature, cities, society and life.³⁰

Le changement de paradigme évoqué dans la citation ci-dessus marque le passage dans les sciences de la linéarité à la non-linéarité. Le paradigme Newtonien considérait le temps comme une valeur répétable. Les sciences non linéaires considèrent quant à elle le temps comme une valeur irréversible. Cette irréversibilité du temps est source d'ordre et s'inscrit dans l'évolution des systèmes. Un système caractérisé par un attracteur étrange est non-linéaire. Lors de son évolution, il gardera en mémoire toutes les variations qu'il a subit. Il ne peut donc être représenté seulement par une droite (comme pour un système linéaire), mais par des courbes prenant des trajectoires complexes. De ces représentations, un nouvel ordre émerge, un ordre plus complexe qui se cache derrière un désordre apparent. Si le passage du linéaire au non linéaire a été très influent pour les sciences, quand est-il de l'architecture ? Une nouvelle science est-elle égale à une nouvelle architecture ?³¹

³⁰ Tiezzi (E), *Steps Towards an Evolutionary Physics*, WIT Press, 2006 p104

³¹ L'expression nouvelle science=nouvelle architecture est issue du sous-titre d'un article de Charles Jencks paru dans la revue AD en 1997, Jencks (Ch)« Non linear architecture, new science = new architecture ?» publié dans Architectural Design, « New science=New architecture ? »,vol 67 n°9/10 Septembre-Octobre 1997

L'architecture reste confinée dans des modèles d'ordres rigides. Les bâtiments s'inscrivent dans des trames strictes où l'imprévisible n'a pas de place. Il y a un véritable décalage entre l'architecture « ancienne » et la nouvelle science. Ce décalage vient majoritairement du fait que les systèmes chaotiques sont perçus comme aléatoires et non déterministes. Les attracteurs étranges ont été appelés ainsi car leurs formes étaient trop complexes et qu'elles ne répondaient pas aux critères de l'ordre de l'époque. Ainsi le terme « chaos » est souvent mal compris et associé à l'aléatoire comme le montre Manuel DeLanda, *son élégante symétrie [attracteur de Lorenz] montre comment le terme « chaos » peut être trompeur, en se concentrant sur l'imprévisibilité des trajectoires dans l'attracteur plutôt que sur sa structure interne complexe et belle*³². Cecil Balmond, ingénieur structure et professeur, nomme « informel » l'ordre derrière le chaos, *L'informel n'est pas aléatoire ni arbitraire, il se base sur la superposition afin de mettre en évidence des séries de certitudes changeantes. Sa logique est contingente par rapport aux conditions initiales. Le chaos est considéré comme une succession de divers ordres, plutôt différents de l'idée que nous avons d'« attraper » l'arbitraire et de le nommer ordre.*³³. Par « l'informel », Cecil Balmond refuse la logique linéaire. L'informel agit comme un agent de libération. L'architecture n'est plus contrainte par des notions traditionnelles mais elle s'ouvre vers d'autres voies de développement. Ces voies sont ouvertes par les ordinateurs qui nous permettent de réaliser des choses que l'on n'aurait jamais crues possibles auparavant.

³² Delanda (M).- Material elegance, in Elegance, in Architectural Design Vol°77, n°1, (London, Architectural Design, Academy Press, 2007) Ali Rahim, Hina Jamelle, editors p23

³³ Balmond (C), « New structure and the informal » in Architectural Design, «New science=New architecture ? »,vol 67 n°9/10 Septembre-Octobre 1997, p 90

Charles Jencks, architecte et historien américain, dans son livre *The architecture of the jumping universe* publié en 1995, s'interroge sur l'influence de l'évolution de notre compréhension du monde sur l'architecture. Pour lui, l'univers étant caractérisé par des phénomènes non-linéaires, l'architecture devrait les refléter. Le cosmos devient ainsi le nouveau standard de l'architecture. Jencks définit l'architecture produite comme *cosmogonique* (la cosmogonie étant la science de l'étude de la formation des objets célestes), *Cosmogogenesis, notre nouveau récit de la Genèse, concerne une soudaine apparition de l'inattendu, un nouveau niveau d'organisation qui influence ses parents. La présente recherche de cette architecture que j'appellerai «cosmogonique» pour suggérer qu'elle est générative, émergente et non une cosmologie statique.*³⁴. L'architecture cosmogonique est une architecture qui inclue la non-linéarité dans son processus de conception. Jencks définit les bâtiments produits comme une architecture de vagues, de plis, de collages, de superpositions et d'ambiguïté.

Dans sa préface de la revue AD « nouvelle science = nouvelle architecture ? » publiée en 1997, Jencks nomme deux bâtiments comme référence de l'architecture cosmogonique : le musée Guggenheim de Bilbao de Frank Gehry (1997), et le centre Aronoff de Peter Eisenman à Cincinnati (1996). Ces deux bâtiments répondent à une nouvelle esthétique. Cette nouvelle esthétique est caractérisée par l'intérêt pour l'inattendu et l'émergence. Elle induit un changement dans les processus de conception par un retour à la spiritualité où les architectes assument l'exploration formelle et réfutent le système newtonien d'une architecture déterministe, *Surprenamment, de nombreux architectes aujourd'hui abandonne leur responsabilité esthétique et la cache derrière le cout, la fonction, les exigences de planification ou d'autres alibis. Si la leçon de la cosmologie récente est que l'environnement n'est pas déterministe, alors l'architecture ne l'est encore moins ; les architectes ont la liberté de choisir un style, des métaphores et un langage formelle.*³⁵. Jencks prône un retour à la spiritualité au sens de la créativité et de l'exploration d'un nouveau langage où la diversité est célébrée. Pour lui, il y a deux approches de l'architecture cosmogonique : la substance de la question et le langage dans lequel elle est créée. Il défend une priorité de recherche formelle et plastique avant le matérialisme ou l'usage. Plus que l'intérêt pour les formules mathématiques, l'architecture « cosmogonique » définit une manière non-linéaire de concevoir (que cela soit à l'aide d'ordinateur ou non), en prenant des références dans différents domaines autres que l'architecture. L'architecture cosmogonique est selon Jencks, une architecture de surprise (positive ou non) et d'émergence. La question philosophique du contrôle des architectes sur ces processus se pose. Pour Jencks, la réponse se situe entre le contrôle et l'imprévu. Un architecte est capable de déterminer un ordre mais un bâtiment doit avoir une part d'imprévisibilité.

³⁴ Jencks (C).- *The architecture of the jumping universe* (Londres, Academy Edition, 1995) p9

³⁵ Ibid p129

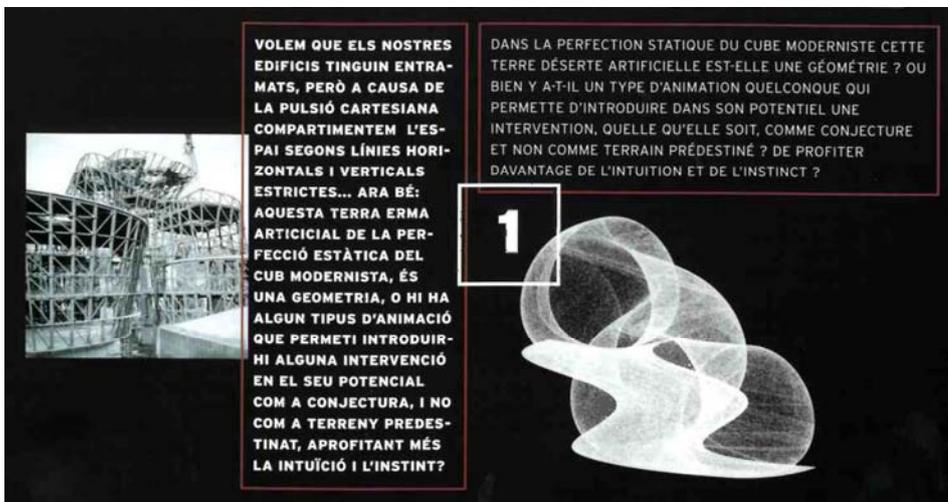
Le projet du centre Aronoff de Peter Eisenman consiste en la réorganisation et l'extension du bâtiment existant. Selon Eisenman, la forme du bâtiment dérive des courbes de la topographie environnante et de la forme des chevrons du bâtiment existant. La dynamique entre ces deux formes organise l'espace entre elles. Dans son analyse du bâtiment³⁶, Jencks le décrit comme situé « loin de l'équilibre ». Situer un système « loin de l'équilibre » permet à sa matière de s'auto-organiser spontanément. Ici la matière est le grès. Eisenman l'organise dans une riche complexité qui rappelle le processus de formation des roches géologiques. Ces processus ne sont pas aléatoires. Pour Jencks, Eisenman a porté une grande attention au choix des conditions initiales. Ce choix détermine l'évolution du système et donc de la forme que prendra le bâtiment, *This [random], however, is not the method used by Eisenman, Libeskind, ARM or the others. Rather, they have used random means to allow an organization to emerge; they have been very selective about the initial conditions- the fractal shape grammar- and the final stage of fine-tuning, that is, after a stage of random generation. In short, they do not pursue formlessness but emergent form, the matter merging from matter.*³⁷. Jencks ne précise pas si de placer le bâtiment "loin de l'équilibre" se fait d'une manière conceptuelle ou alors à l'aide d'ordinateurs. Pour le centre Aronoff, Eisenman utilise la simulation par ordinateur pour générer et déformer la forme du bâtiment. L'usage de l'ordinateur permet alors la complexité obtenue. Pour le musée Guggenheim, le raisonnement est inverse. Gehry n'utilise pas de logiciels informatiques dans son processus de conception. L'ordinateur intervient lors de la phase de construction, avec l'introduction d'un logiciel normalement destiné à l'aviation. Ainsi il y a une ambiguïté dans la notion « d'architecture non-linéaire » selon Jencks : est-ce une architecture réalisée à l'aide de logiciels qui permettent de simuler des systèmes non-linéaires ou est-ce un processus de conception non linéaire, car les deux sont foncièrement différentes. Les sciences non-linéaires étudient rigoureusement par différentes théories des systèmes dynamiques complexes. Ainsi si ce nouveau paradigme a une influence sur l'architecture, il doit l'avoir en introduisant comme pour les sciences, les mathématiques et l'informatique dans le processus de conception de l'architecte.

³⁶ Jencks (Ch), Landform architecture, emergent in the nineties in Architectural Design, « New science=New architecture ? », vol 67 n°9/10 Septembre-Octobre 1997

³⁷ Op cit p21

De par cette ambiguïté, le terme d'architecture cosmogonique n'a pas perduré. Aujourd'hui aucun architecte (mise à part Jencks) se réfère à ce mouvement. Eisenman ou Gehry qui produisent des bâtiments avec des formes complexes ne font pas référence au cosmos, ni à la spiritualité dans la description de leurs projets. Il est vrai que les bâtiments produits peuvent nous rappeler formellement des systèmes non-linéaires. Ainsi dans le numéro de Quaderns intitulé « spirales »³⁸ paru en 1999, Ivar Ekeland compare différents projets à des images d'attracteurs étranges. Il associe ainsi le musée Guggenheim de Frank Gehry à un attracteur de Pickover, et le pavillon de l'exposition « realscape in quicktime » de UN studio à l'attracteur de Rosler. Dans *The architecture of the jumping universe*, Jencks va plus loin en comparant la Bavinger House de Bruce Goff à un attracteur étrange, alors que la maison a été réalisée en 1955 et que Lorenz découvre son attracteur au début des années 60. Il est alors peu probable que Bruce Goff ait jamais entendu parler des attracteurs étranges.

Il se peut que les attracteurs étranges aient pu inspirer divers architectes, mais la comparaison entre un projet complexe et un attracteur reste trop littérale (surtout si elle est faite après coup). Je réduirai donc l'architecture cosmogonique à une architecture non linéaire dans son processus de conception à l'aide d'outils informatiques pour simuler des systèmes dynamiques plus qu'à un bâtiment s'inspirant formellement d'un système non linéaire.



Ivar Ekeland, comparaison de l'attracteur de Pickover et du musée Guggenheim de Frank accompagnée d'une citation d'informel de Cecil Balmond



Ivar Ekeland, comparaison de l'attracteur de Rosler et le pavillon de l'exposition « realscape in quicktime » de UN studio accompagnée d'une citation d'informel de Cecil Balmond

³⁸ Quaderns, spirales, Collego d'arquitectos de Catalunya, Barcelona, 1999

Pour Jencks le prochain défi pour une architecture encore plus cosmogonique serait d'incorporer de véritables parties mobiles dans le bâtiment et d'impliquer l'habitant ou le spectateur dans une relation participative avec des objets pour refléter le processus de cosmogénèse.

Sara Franceschelli professeur en épistémologie à l'université de Lyon réalisa (non digitalement) avec ses étudiants en 2008 une structure qui modifie ses caractéristiques en fonction de l'interaction avec les visiteurs. Les visiteurs évoluent sous une toile tendue et peuvent en tirant des câbles en modifier la tension. Cette installation reflète le comportement d'un système sous la variation de ces paramètres de contrôle, *Under the variation of the action of the control parameters, one can observe different spatio-temporal « scenarios »*. *The retained definition of scenario is defined by the series of bifurcation a system undergoes under the variation of its parameters.*³⁹. Ce projet va plus loin qu'une simple expérimentation formelle car il prend en compte les propriétés du matériau (en l'occurrence de la toile tendue) dans l'évolution du projet. Avec les nouveaux outils que dispose l'architecte, on peut aujourd'hui simuler des systèmes chaotiques déterministes et introduire différentes propriétés des matériaux, pour en analyser leurs évolutions.

Par leurs richesses formelles, les attracteurs étranges permettent l'exploration d'un nouveau langage formel. Ils proposent une esthétique qui vient rompre avec l'architecture « ancienne ». Lors du processus de conception des formes émergent et évoluent différemment en fonction des conditions initiales. La recherche formelle permise est riche mais la matérialisation dans un espace physique l'est encore plus. Les véritables parties mobiles dans le bâtiment seront alors intrinsèques aux comportements de la matière.

³⁹ Franceschelli (S) Morphogenesis and dynamical systems, Imagine Math 2, Emmer M, 2013 p 122

Les attracteurs (étranges) comme générateurs de projets

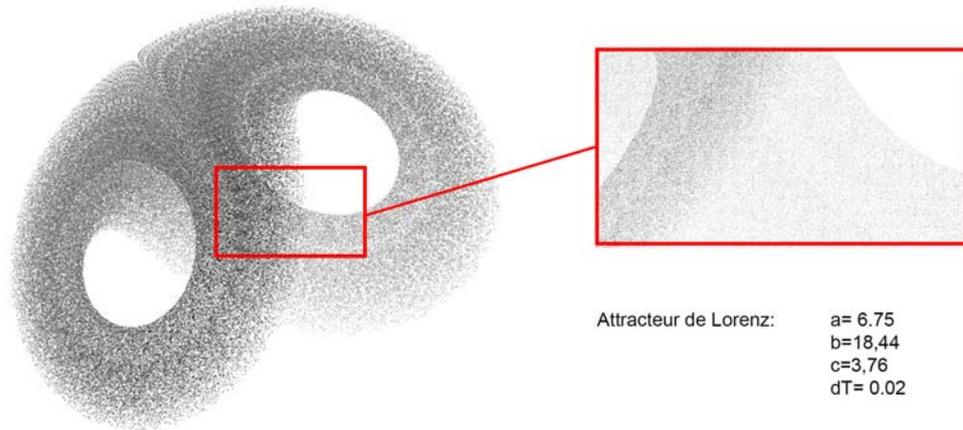
Dans la continuité de sa recherche sur l'influence de la nouvelle science sur l'architecture, Jencks réalisa en 1999 un aménagement paysagé pour la galerie d'art moderne d'Edimbourg reprenant la forme de l'attracteur de Ueda. Ce relief a été conçu pour animer le gazon, et protéger la galerie des bruits de la route avoisinante. D'un point de vue esthétique, le projet reprend bien les caractéristiques formelles de l'attracteur de Ueda. Sa forme en « S » est interprétée comme une topographie où les visiteurs évoluent.



*Image de gauche: Maquette du projet. Image de droite : la référence de Jencks, l'attracteur de Ueda.
Charles Jencks Landform of Ueda, gallery of modern art, Edimburg Scotland 1999-2002⁴⁰*

Cependant, Jencks n'utilise pas les équations qui définissent l'attracteur de Ueda pour générer son projet. Il ne se sert que de sa représentation en deux dimensions comme source d'inspiration. On retombe donc dans les limites de l'architecture cosmogonique où l'influence de la science dans l'architecture ne se résume qu'à l'ajout de nouvelles références esthétiques. Ainsi nous nous intéresserons dans la partie suivante, à un projet qui utilise les équations qui définissent les attracteurs étranges. De ces équations les architectes obtiennent des nuages de points. Un système dissipatif soumis à un attracteur est composé d'une infinité de points qui augmentent avec le temps. Ces points ne forment pas des surfaces ou des lignes, les attracteurs ainsi ne définissent pas d'espace dans le sens « d'espace clos » que nous entendons aujourd'hui. Entre ces points se trouvent des espaces intermédiaires « entre », plus on augmente le nombre de points, plus des espaces se forment et se définissent. Les attracteurs n'ont pas de matérialité ni d'échelle, ils sont seulement définis par un nombre de points. Cela introduit la globalité dans la localité avec des transferts de la partie vers le tout et réciproquement. Notre habitude, nous pousse à distinguer des espaces dans les images que nous percevons des attracteurs sans en être véritablement certains. Les espaces que nous pensons percevoir restent flous, sans limite. Les attracteurs jouent sur les limites et leurs indéterminations. Ils n'ont pas de détails, ils sont composés de la simple juxtaposition évidente et directe d'éléments.

⁴⁰ <http://www.charlesjencks.com/#!/projects-ueda>



Modélisation de l'attracteur de Lorenz à l'aide du logiciel Chaoscope. L'attracteur est composé d'une multitude de points.

Dans *Materiality : Anexact and intense*⁴¹, Manuel DeLanda s'intéresse à l'application de ces espaces « flous » ou « inexacts » en architecture en analysant le passage dans le processus de conception des architectes d'une pensée purement conceptuelle à une priorité morphogénétique. Mathématiquement, l'architecture est définie dans un espace métrique, c'est-à-dire un espace dans lequel une notion de distance est définie entre les éléments. Un espace métrique analyse d'une manière numérique la quantité d'éléments qui le composent. Les espaces produits par un système caractérisé par un attracteur étrange sont définis par les relations qu'entretiennent les éléments entre eux. On pourra comparer les différentes solutions produites, mais ces comparaisons même les plus rigoureuses possibles resteront inexactes⁴². Pour traduire ces espaces « inexacts » en architecture, il ne faut plus penser de manière quantitative mais qualitative. Il ne faut plus penser en termes de ligne mais de surfaces, de zones et non de points, d'ordre et non de quantité. La citation ci-dessous de Manuel DeLanda exprime ce raisonnement :

Un espace dans son sens mathématique n'est pas seulement caractérisé par un ensemble de points mais aussi par une définition de la proximité entre les points, en d'autres termes, par les relations qui définissent un sous-ensemble donné de points comme voisinage. Si la proximité est définie par une longueur minimale (par exemple, tous les points inférieurs à une distance donnée à partir d'un centre de voisinage), l'espace est dit métrique (si plat, comme dans la géométrie euclidienne, ou courbé comme dans les versions non - euclidiennes). Si d'autres critères sont utilisés pour spécifier quels points sont situés à proximité d'autres points, l'espace est considéré comme non - métrique (comme dans les géométries, projectives, différentielles ou topologiques). Quel autre critère de proximité peut être utilisé ? Dans la géométrie différentielle, par exemple, on

⁴¹ DeLanda (M), *Materiality : Anexact and Intense*, in Lars Spuybroek, *Machining Architecture Nox*, London, Thames & Hudson, 2004,p370-377

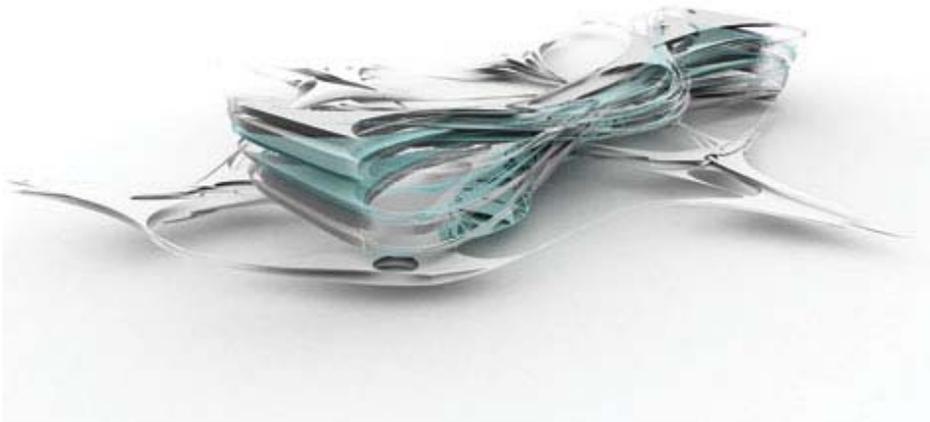
⁴² La notion d'*inexact mais rigoureux* est introduit par DeLanda en référence à Deleuze et Guattari, Deleuze lui-même faisant référence à Husserl *Qu'est-ce que c'est ?* [en parlant des essences intermédiaires] *Ce sont des essences morphologiques. Ce sont des essences morphologiques par opposition aux essences fixes ou formelles. Il [Husserl] dit encore que ce sont des essences inexactes, ou mieux : anexactes. C'est par opposition aux essences formelles qui sont d'autant plus exactes qu'elles sont métriques. Ce sont donc des essences amétriques, anexactes, et dans une très belle formule, il dit: leur inexactitude ne vient ni du hasard, ni d'une tare, ce n'est pas une tare pour elles d'être inexactes; elles sont inexactes par essence, bien plus, il va jusqu'à dire qu'elles se déploient dans un espace et un temps eux-mêmes anexactes. Donc, il y aurait un espace et un temps exacts, oui, l'espace et le temps métriques, et il y aurait un espace et temps anexactes, non métriques; et il y aurait des essences qui se déploieraient dans un espace-temps anexacte. Il ajoute, mot sublime, c'est des essences vagues. Il sait très bien que vague, c'est vague. Ce sont des essences vagabondes.*

Citation issue de (consulté le 31/01/2013):

<http://www.webdeleuze.com/php/texte.php?cle=185&groupe=Anti+Oedipe+et+Mille+Plateaux&langue=1>

prend avantage du fait que le calcul fonctionne sur des équations exprimant les taux de variation et que l'un de ses opérateurs (différenciation) donne à sa sortie une valeur instantanée de cette vitesse de variation. Les points qui forment un espace peuvent alors être définis non pas par des longueurs rigides à partir d'un système fixe (comme dans le cas métrique) de coordonnées, mais par la vitesse instantanée à laquelle le taux de courbure change en ce point. Certaines parties de l'espace ne changeront pas du tout, d'autres parties peuvent être en train de changer lentement, tandis que d'autres peuvent être en train de changer très rapidement. Un espace différentiel (un collecteur), en effet, devient un champ de rapidités et de lenteurs, et à travers ces relations infinitésimales on peut spécifier le voisinage sans avoir à utiliser de longueur rigide.⁴³

En partant de ces potentialités, Flotsam (une jeune équipe d'architecte provenant de la AA) ont développés durant leurs thèses à la AA⁴⁴ une méthode pour interpréter et utiliser les nuages de points issus des attracteurs. Ce projet d'un centre de presse s'inscrit dans le cadre des jeux olympiques 2012. Leur stratégie était de proposer un plan poreux pour que le bâtiment devienne un catalyseur du développement urbain connectant Trafford City au complexe olympique. Ce projet est l'un des seuls qui utilise les attracteurs étranges comme « générateurs de projet ».



*Projet d'étudiant de la AA utilisant les attracteurs comme générateur de projet
DRL Flotsam team (Tuteur : Utsuke Obuchi ; Etudiants: Ozgur Erboga, Lillie Liu, Theodora Ntatsopoulou et Victor Orive), Parametric Urbanism 1, DRL v.9 2005-2007⁴⁵*

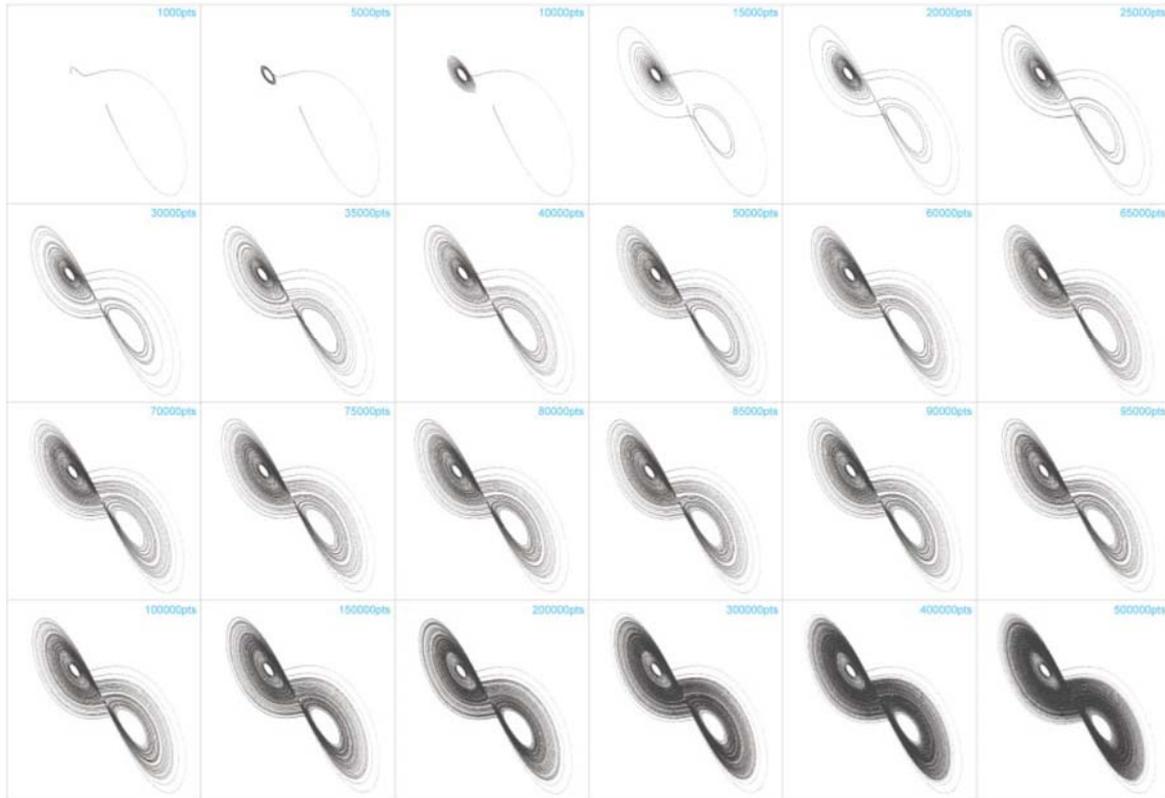
Le projet prend parti de la nature fractale et sans échelle des attracteurs pour se développer à deux échelles, celle de la ville et du bâtiment. A l'échelle de la ville, la première étape est une analyse des réseaux pour repérer les « hub points » situés à l'intersection du plus grand nombre de trajectoires. Ces « hub points » deviendront par la suite les points attracteurs du système. Les espaces intérieurs sont créés dans les vides situés entre les trajectoires et sont hiérarchisés en fonction de leurs degrés de connectivités.

La base du projet est le nuage de points produit par les attracteurs étranges. Ces points deviennent des surfaces après différentes itérations. L'un des paramètres clés est le nombre d'itérations. En changeant le nombre de points, ils peuvent contrôler l'information qu'ils donnent à une surface et sa résolution (plus il y a de points plus la surface est définie).

⁴³ DeLanda (M), Materiality : Anexact and Intense op cit p371

⁴⁴ Architectural Association, école d'architecture située à Londres

⁴⁵ *Experiment in associative urbanisme, in Digital Cities, in "Architectural Design" Vol°79, n°4 (London, Wiley, 2009) p30*



Représentation de l'attracteur de Lorenz en fonction de son nombre de points⁴⁶

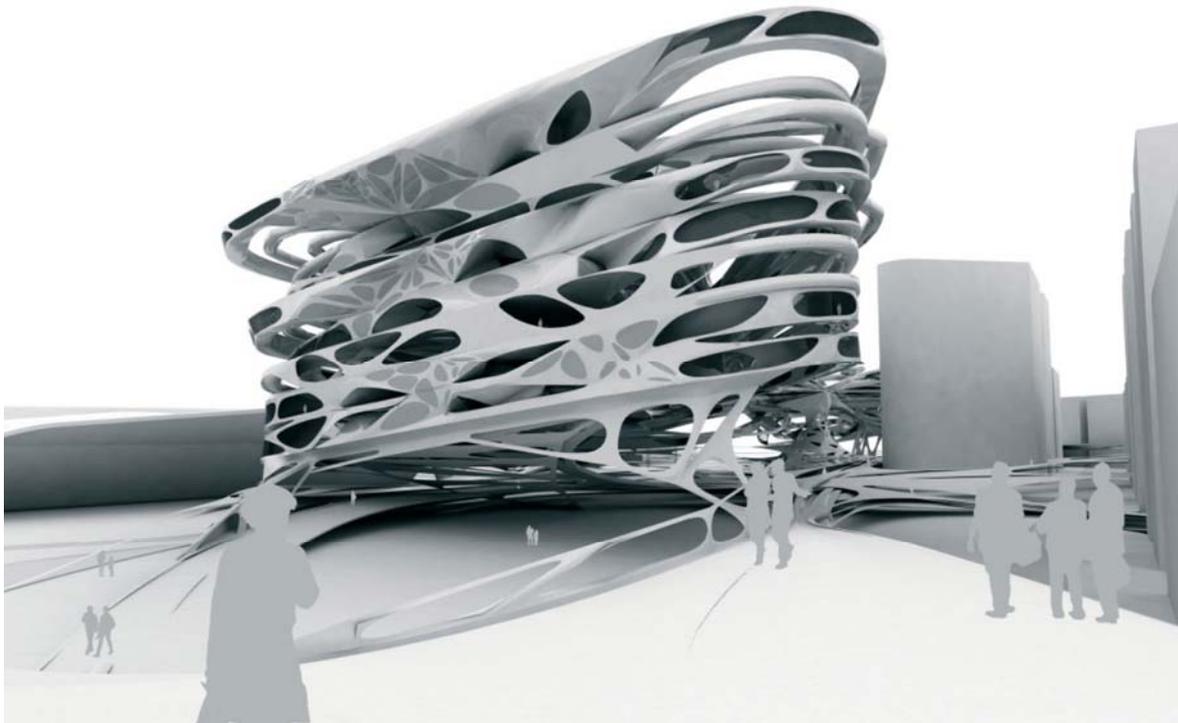
L'image précédente nous montre différentes modélisations de l'attracteur de Lorenz en fonction du nombre de points qui le composent. Le nombre de points varie de 1 000 à 5 000 000. Différentes formes et résolutions de l'attracteur émergent de cette recherche. A 1 000 points, la trajectoire forme une « ligne » ouverte qui commence une boucle. A partir de 15 000 points le dessin de l'attracteur est plus net, on reconnaît sa forme caractéristique (une boucle qui s'entrelace composée de deux pôles). Le nombre de points augmente alors concentriquement autour de ces deux pôles entre les deux « lignes » qui délimitent l'attracteur.

A travers le script, Flotsam est capable de contrôler et de représenter à différentes phases la nature des points composant l'attracteur (des cercles, des rectangles, les lier en surface, etc.). Pour Flotsam, l'intérêt ici de travailler avec les attracteurs étranges est la gestion des trajectoires. Les flux sont attirés et organisés par les points attracteurs. En fonction de ces flux et des conditions initiales du site, la morphologie du bâtiment change.

Les attracteurs étranges sont utilisés ici comme base pour le développement du projet. Une fois l'attracteur généré, il est retravaillé à l'aide de script pour mieux définir les espaces et les parcours.

⁴⁶ *Experiment in associative urbanisme, in Digital Cities, in "Architectural Design" Vol°79, n°4 (London, Wiley, 2009) p31*

Il y a une grande différence, entre les premières modélisations de la simple contextualisation d'un attracteur sur le site et le projet à son état final. Flotsam utilise seulement quelques caractéristiques des attracteurs pour développer le projet. La métaphore n'est pas littérale, ce n'est pas un attracteur étrange ajusté à son contexte. A l'inverse, c'est le contexte qui produit une première forme qui est ensuite retravaillée pour la rendre « vivable ». Cependant cette forme reste un « arrêt sur image du processus », le bâtiment à l'état final ne reproduit plus les caractéristiques de sa modélisation computationnelle tel que la sensibilité aux conditions initiales.



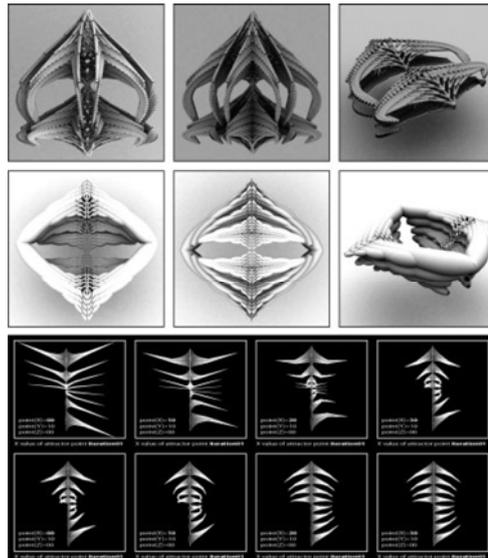
Vue de l'extérieur du « bâtiment attracteur ». La porosité de la façade dépend du nombre de point⁴⁷.

Le projet de Flotsam utilise les attracteurs étranges comme générateurs de forme. Le nuage de points qui compose l'attracteur donne sa morphologie au projet. Ils obtiennent alors un bâtiment complexe avec des parcours internes et des espaces plus ou moins fermés. Il y a peu d'exemple comme celui-ci, pourtant l'utilisation de points attracteurs est une méthode utilisée dans la conception de projet. Les attracteurs sont alors utilisés comme des points qui en fonction de leur position et de leur rapport à un système en modifie ses caractéristiques. Cette méthode est notamment très utilisée dans Grasshopper.

“In case of design and geometry, attractors are elements (usually points but could be curves or any other geometry) that affect other geometries in the space, change their behaviour and make them displace, re-orientate, rescale, etc. They can articulate the space around themselves and introduce fields of actions with specific radios of power. Attractors have different applications in parametric design, since they have the potential to change the whole objects of design constantly. Defining a field, attractors could also affect the multiple agent systems in multiple actions. The way they could affect the product and the power of attractors are all adjustable.”⁴⁸

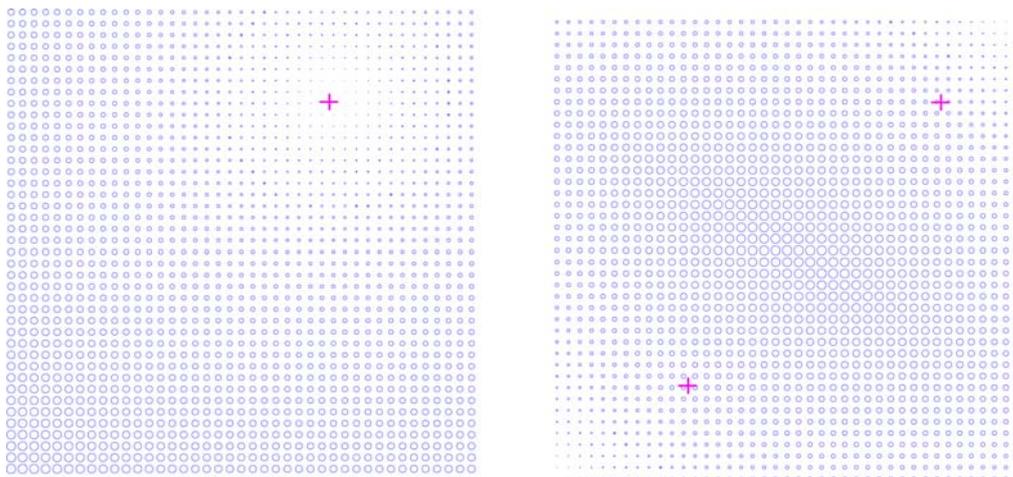
⁴⁷ *Experiment in associative urbanisme, in Digital Cities op cit p 31*

⁴⁸ Generative algorithms p65. (Issue du manuel d'apprentissage de grasshopper)



Neri Oxman, *tropisms : computing theoretical morphospaces of branching growth systems*, MIT, 2006⁴⁹

L'image ci-dessus provient d'un projet développé par Neri Oxman en utilisant la technique des "points attracteurs". La logique suit la règle initiale de « croissance » et de « décroissance » avec des points attracteurs qui affectent localement le système. Les images représentent différents états du projet en fonction de la position des points attracteurs. La topologie reste la même, mais la géométrie change. Les points attracteurs font partis avec les attracteurs étranges des trois différents types d'attracteurs que nous avons défini dans la première partie. Dans Grasshopper, ces points peuvent influencer de différentes manières un projet. Dans l'exemple ci-dessous, la distance du point attracteur aux centres des cercles définit leurs rayons. Le processus est donc ajustable, en fonction de la distance, les cercles seront plus ou moins grands. En la présence de plusieurs attracteurs, la notion de bassin d'attraction devient importantes. Chaque attracteur possède son bassin d'attraction et influence les cercles situés dedans. Ainsi les cercles de l'image à droite auront des diamètres différents en fonction du bassin d'attraction dans lequel ils se situent. Les attracteurs et les repousseurs peuvent aussi créer un champ magnétique et influencer des systèmes d'agents.



Grasshopper : vue de deux points attracteurs qui en fonction de leurs positions modifient le diamètre des cercles. En fonction du bassin d'attraction dans lequel les cercles se situent, leurs rayons seront différents.

⁴⁹ *Experiment in associative urbanisme*, in *Digital Cities*, in "Architectural Design" Vol°79, n°4 (London, Wiley, 2009) p32

Vers un bâtiment attracteur ?

Par sa sensibilité aux conditions initiales, le bâtiment attracteur s'adapte aux conditions externes du site. Des formes émergent en fonction de la variation des paramètres. Ces paramètres sont définis par l'architecte, ils peuvent aller de la température au déplacement des visiteurs. Le choix de l'attracteur est primordial. En fonction du programme, l'architecte peut choisir différents types d'attracteurs qui répondraient à des caractéristiques différentes. Par exemple pour le projet de Londres, Flotsam a choisi l'attracteur polynomial 21 pour son grand nombre de paramètres. Le nombre et la disposition des points attracteurs influence elle aussi la forme finale que prendra le bâtiment. En effet ce sont ces points qui vont attirer et définir les trajectoires que prendra le système. Par conséquent si on les déplace ou si on change leur valeur (en définissant un attracteur plus fort qu'un autre) le système évoluera différemment. Par leur nature fractale, on peut travailler le bâtiment à toutes les échelles, de son intégration aux sites, à la disposition des espaces. Différents types attracteurs peuvent être aussi jumelés entre eux pour obtenir un projet plus complexe. Par exemple un attracteur étrange peut être associé dans le même espace des phases avec un attracteur simple.

A l'échelle architecturale, un bâtiment ressemblant à un attracteur est une interprétation trop littérale. En architecture, les attracteurs ne donnent pas la solution parfaite. Nous ne sommes pas dans l'utopie où en un « clic » le bâtiment est produit. Les attracteurs étranges sont utiles pour simuler des systèmes dynamiques, mais leur transposition purement esthétique à l'architecture réduit de nombreuses possibilités de leurs usages. Ainsi, se contenter de mettre à l'échelle la forme produite par un attracteur est une solution trop réductionniste, tout autant que de se contenter d'un arrêt sur image. Pour revenir à la définition, un attracteur étrange permet la prévision à long terme d'un système dynamique. Les attracteurs étranges sont donc des systèmes en mouvement. Les représentations que nous en tenons sont des arrêts sur image à un instant t mais il ne faut pas s'y arrêter. Le vrai potentiel des attracteurs étranges se trouvent à l'échelle de la matière. Une matière sensible aux conditions initiales qui garde les traces de son évolution. Tous les projets précédents ne s'intéressaient qu'à l'esthétique des attracteurs en convertissant les nuages de points produits en surfaces rigides. Cependant par la nature des relations que l'on donne entre les différents points, le projet peut prendre différentes caractéristiques. Ainsi on peut imaginer une matière évoluant en fonction de l'évolution des paramètres. Ou alors relier les différents points par des lignes d'une matière qui composerait une résille fractale. L'entremêlement des lignes créera un maillage a-scalaire visible à toutes les échelles comme l'a expérimenté EZCT pour l'exposition au frac centre en 2013⁵⁰. Ainsi pour revenir à la question de l'édifice attracteur, s'il doit exister, il doit avoir les mêmes caractéristiques qu'un attracteur étrange et non se résumer simplement à une recherche esthétique.

⁵⁰ Ezct « étude de treillis récursifs », *ArchiLab Naturaliser l'architecture*, exposition au Frac centre, 2013

De nouveaux comportements de la matière

Dans les exemples précédents, nous avons vu l'utilisation des attracteurs étranges pour la conception de projets à l'échelle architecturale et urbaine. Ces travaux s'attachaient plus aux caractéristiques formelles qu'ils pouvaient exprimer, qu'à leur nature. Cependant se pose une question encore plus ambitieuse que de la pure recherche formelle. Les attracteurs n'ayant pas d'échelle, ils peuvent ainsi être appliqués à des échelles très grandes ou infiniment petites tel que le comportement intrinsèque de la matière. Il y a une différence entre des systèmes chaotiques étudiés mathématiquement et des processus chimiques qui expriment les mêmes conditions. Pour ces derniers, les différents comportements de la matière sont pris en compte et l'irréversibilité est alors capable de s'inscrire dans la matière en créant une trace des conditions de sa formations, à *l'étude du cristal idéal se substitue aujourd'hui celle des cristaux concrets, dont chacun constitue, par sa structure singulière (défauts, dislocations, etc.), une mémoire du chemin emprunté lors de sa formation. De nouvelles propriétés électriques, magnétiques, mécaniques, optiques peuvent aussi être créées, qui ne renvoient pas à une définition générale du matériau mais à son histoire.*⁵¹ Ainsi ces matériaux seraient les résultats des conditions passées et non seulement de leurs caractéristiques générales. De plus d'après Prigogine et Stengers, l'état d'équilibre du système influence sur sa croissance et les structures obtenus, *Prenons d'abord l'exemple des flocons de neige. Si un flocon est constitué de flocons très réguliers, sphériques, nous pouvons en déduire qu'il s'est formé près de l'équilibre. Si, au contraire, ses cristaux présentent une structure à branches bien développées, il s'est formé loin de l'équilibre : la croissance a été très rapide, les molécules n'ont pas eu le temps de diffuser régulièrement sur la surface.*⁵² Ces comportements de la matière peuvent être vus comme un processus de recherche de forme ou « form-finding ». Le form-finding est la recherche de la forme optimale sous des contraintes dans un processus d'optimisation structurelle. Les modèles de form-finding les plus connus sont les expérimentations de Frei Otto avec des bulles de savon pour permettre le calcul de surfaces minimales et les maquettes funiculaires de Gaudi pour le projet de la Sagrada Família à Barcelone. Pour ces exemples, l'espace des phases de ces systèmes est défini par un attracteur. Ce point attracteur correspond à l'état optimal du système. Si on modifie les conditions initiales cela modifiera les caractéristiques du point attracteur et donc l'état optimal du système :

*Une réponse est que, dans l'espace des formes possibles, l'une d'entre elle (une sphère) semble être favorisée énergétiquement. Cependant une réponse plus éclairante est que l'espace des possibilités est pré-structuré de manière à ce qu'une forme particulière attire le processus de différence-annulation vers un résultat donné. Puisque le résultat n'est pas toujours une sphère, mais quelle que soit la forme elle arrive à minimiser la tension de la surface étant donné les contraintes, la forme attirée ne peut être une sphère ou tout autre forme métrique. Mathématiquement, l'espace des possibilités est appelé espace des « phases » ou « état » des phases (un espace regroupant tous les états possibles d'un système) et la forme qui agit comme attracteur est un point singulier dans cet espace. Il se trouve que ce point singulier est toujours un invariant topologique de l'espace d'état (lui-même généralement une variété différentielle). C'est dans ce sens que les processus matériels qui possèdent le pouvoir morphogénétique, le pouvoir de trouver ou produire une forme donnée, sont toujours entraînés intensivement et guidés topologiquement.*⁵³

⁵¹ Prigogine (I) ; Stengers (I).- Entre le temps et l'éternité op cit p114

⁵² Ibid

⁵³ DeLanda (M), Materiality : Anexact and Intense op cit p374

La présence d'un attracteur attirera toujours un système vers sa forme optimale et la définira topologiquement. Les systèmes évoqués précédemment ne sont définis que par un seul attracteur. Cela signifie que ces systèmes évoluent vers un optimum qui est le choix le plus favorable étant donné les conditions initiales, alors que des systèmes plus complexes vont quant à eux évoluer vers de multiples optima. Ces systèmes sont alors caractérisés par de multiples attracteurs. En fonction de son bassin d'attraction le système évoluera vers un optimum local parmi de nombreux autres alternatifs d'optima possibles. Ainsi ce qui est important est le « chemin » emprunté par le système car en fonction des variations, le chemin emprunté sera modifié et le système évoluera donc vers un autre optimum local, *Cela signifie simplement que l'histoire compte. Alors que dans les systèmes avec un unique optimum global chaque chemin est en fait différent (chaque chaînette ou bulle de savon va atteindre son état d'équilibre d'une manière différente), l'histoire de la façon dont le système a atteint l'optimum peut être ignorée, étant donné que toutes les histoires ont la même "destinée". Cependant avec les équilibres multiples, l'histoire ne peut être ignorée, depuis que les optima locaux à un système existent et où un système peut atteindre un optimum local est maintenant une fonction de ce qui se passe dans le système sur ce chemin. Philosophiquement ce changement fait toute la différence dans le monde.*⁵⁴. Une matière peut donc s'exprimer par elle-même dans des formes complexes et créatives. Ainsi il ne faut plus voir la matière comme inerte mais comme une matière active capable de générer des formes. Manuel DeLanda dans *Materiality : Anexact and Intense* nomme cette matérialité inexacte et intense. Inexacte car elle est le résultat d'un système non métrique, et intense car elle s'exprime sous de nombreuses formes complexes.

⁵⁴ DeLanda (M), *Materiality : Anexact and Intense* op cit p376-377

Pour des systèmes différents, pour des états de matière différents (solide, liquide, gaz) durant la transition de phase (par exemple de liquide à solide), l'auto-organisation de ces systèmes présente des caractéristiques communes, « *the behavior of entirely different material systems can exhibit « universal features »*. »⁵⁵ explique DeLanda. Lors de l'auto-organisation, les systèmes organiques ou non-organiques présentent une structure mathématique commune appelée « mécanisme mathématique ». Ces mécanismes mathématiques, tels que les bifurcations ou les attracteurs, sont au début du processus d'auto-organisation et sont applicables à tous les systèmes. Ils permettent par la multiplicité des choix qu'ils offrent de générer des formes complexes, créatives et d'une grande beauté. Les bifurcations sont des phénomènes qui arrivent au début du processus d'auto-organisation. Par exemple, dans le cas d'une réaction chimique un système est régi principalement par deux forces, le taux de diffusion et le taux de réaction. Quand le taux de diffusion est supérieur, le système est en état d'équilibre car grâce à la dissipation d'énergie son niveau d'entropie est au minimum. Cependant lorsque le taux de réaction est supérieur, le système adopte une nouvelle organisation appelée équilibre dynamique qui répond aux nouveaux besoins en énergie. La bifurcation se produit quand le système atteint un point critique au changement de rapport entre les différents taux. Par l'universalité du phénomène, cette solution est applicable à des systèmes organique ou non-organique. Gilles Deleuze et Félix Guattari propose d'appeler ces solutions communes « phylum machinal », « a term that would indicate how nonlinear flows of matter and energy spontaneously generate machinelike assemblages when internal or external pressures reach a critical level. »⁵⁶. Le "phylum machinal" serait une seule source d'ordre pour toutes les réalités. Encore une fois, les systèmes de bifurcation avaient déjà été observés par Henri Poincaré au début des années 1890 mais il a fallu attendre les ordinateurs pour pouvoir les modéliser dans des systèmes non-linéaires.

⁵⁵ Delanda, (M.).- *Non organic life*, op. cit p134

⁵⁶ Ibid p 136

Les attracteurs étranges autorisent la matière à explorer de nombreuses combinaisons possibles que cela soit formel ou matériel. Les bifurcations, les solitons, les catalyseurs, ou les attracteurs sont à la base du processus d'auto-organisation de la matière. On retrouve ces phénomènes non-organiques dans de nombreux systèmes électroniques ou chimiques mais aussi vivants. Ils permettent par la multiplicité des choix qu'ils offrent de générer des formes complexes, créatives et d'une grande beauté.

L'étude des différents états de la matière est primordiale dans la recherche formelle permise par les attracteurs étranges. Pour certaines conditions de pressions et de températures, plusieurs phases peuvent cohabiter. Par exemple, un aérosol est le mélange entre deux phases : liquide et gaz. En fonction de sa phase (solide/liquide/gazeuse), un système n'évoluera pas de la même façon. La variation de cette matérialité plus ou moins solide, liquide ou gazeuse permet d'explorer de nouveaux comportements de la matière.

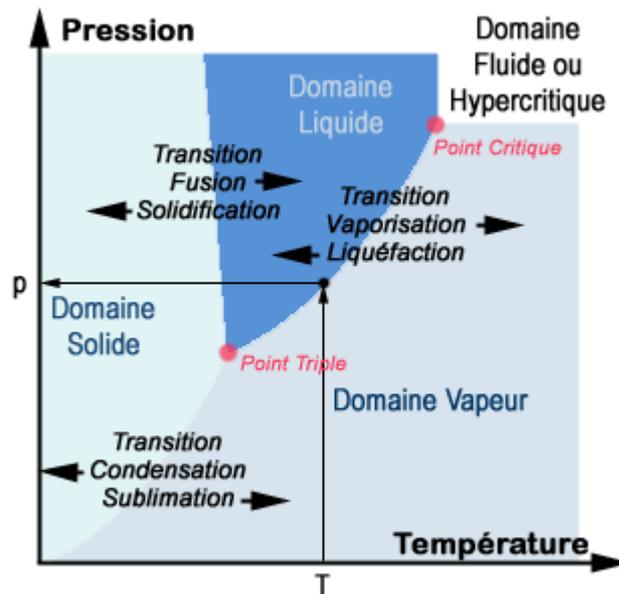


Diagramme montrant les changements d'états physiques de la matière⁵⁷

Le schéma ci-dessus montre les différentes phases de la matière. A la transition de phase (par exemple entre solide et liquide), la matière change d'état. Lors de cet état « hybride », la matière est composée de plusieurs phases. La matérialité de ces systèmes n'est ni solide ou liquide mais molle. On appelle ces substances des colloïdes, « *un colloïde est la suspension d'une ou plusieurs substances, dispersées régulièrement dans une autre substance, formant un système à deux phases séparées, continues et dispersées.* »⁵⁸.

⁵⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Transition_de_phase consulté le 14/06/2013

⁵⁸ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Collo%C3%AFde> consulté le 14/06/2013

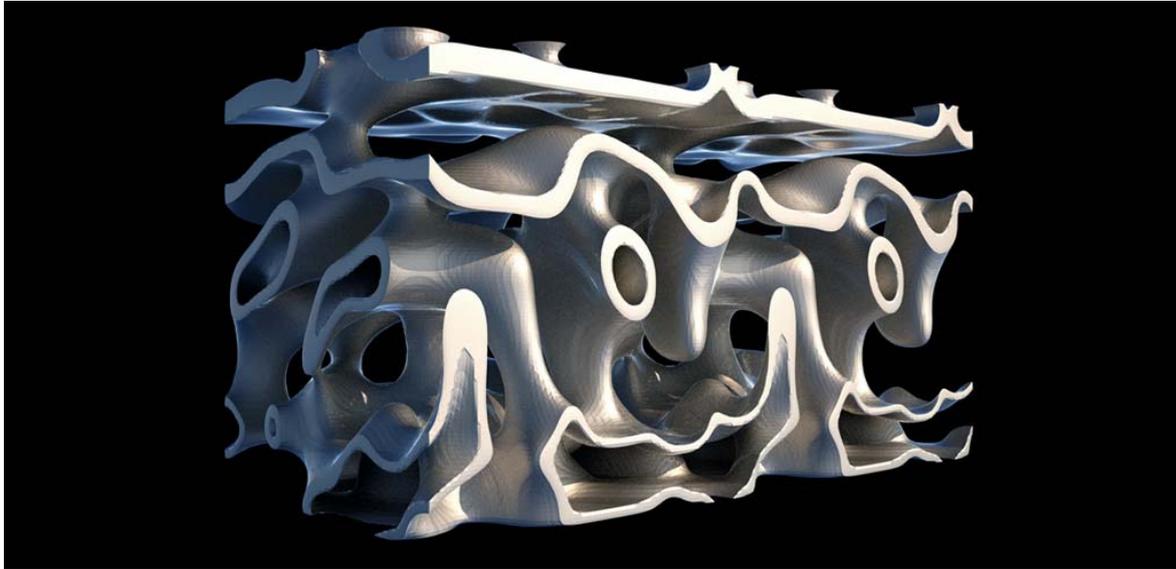
Selon DeLanda, pour explorer ces nouveaux états de la matière, Stuart Kauffman et Christopher Langton recommandent que les systèmes soient localisés non pas à la bordure des bassins d'attraction mais au voisinage de bifurcations. Ils nommèrent cette région, « région magique » car c'est la zone dans l'espace des phases où les effets de l'auto-organisation sont le plus efficaces et complexes, « *the state at the edge of chaos exists in the vicinity of the solid-liquid bifurcation. It is a state that is not too liquid, but not too solid either, that is, a state with the right viscosity or consistency.* »⁵⁹.

Manuel DeLanda illustre ces états de matières dans l'étude d'une planète « hypothétique » composée d'un seul élément : le crystal. Au commencement la planète n'est composée que de plasma. Le plasma à sa température la plus élevée n'a pas de forme, il est composé de flux de matières et d'énergies. Quand sa température dépasse le point critique que tolère le système, des bifurcations apparaissent ce qui entraîne la création de nouveaux attracteurs. La présence des attracteurs définit la configuration du plasma. Ainsi des formes émergent d'une matière informe à travers l'interaction des bifurcations et l'actualisation des attracteurs qui en résultent. Pour cette planète, les interactions sont apparues suite à la variation de la température. Si on ajoute plus de paramètres, par exemple en considérant une planète composée de plus d'un élément, le nombre de solutions et d'évolutions possibles du système va fortement augmenter. De plus les éléments vont interagir entre eux et créer de nouvelles substances, « *the gas, liquid and solid phases of the materials may enter into complex mixtures called « colloids » - examples of which are a solid and a gas (an aerosol), a solid and a liquid (gel), or any other, more complex combination.* »⁶⁰. Le résultat de ces interactions va permettre de créer une planète plus réaliste où la multitude des paramètres va augmenter le nombre de bifurcations possibles.

⁵⁹ Delanda, (M.).- *Non organic life*, op. cit p159

⁶⁰ Delanda, (M.).- *Non organic life*, in Zone 6: Incorporation, Jonathan Crary et Sanford Kwinter editors, 1992 p141

Dans *Voxel-based Geometries* (en 2009), Michael Hansmeyer utilise les voxels pour simuler un système dissipatif. Par l'utilisation de voxels, ce projet permet d'étudier l'apparition de structure spatiale dans un espace à trois dimensions. Hansmeyer se confronte à la nature des systèmes dissipatifs, où une infime variation des paramètres extérieurs entraîne des modifications sur l'ensemble du système, " *A miniscule change in parameters leads to the formation of an entirely different structure, or it can prohibit a structure from forming at all. A deliberate, constructive use of these processes on an architectural level appears a long way off.*"⁶¹.



*Voxel-based Geometries : génération de forme à partir d'un système dissipatif*⁶²

Cette expérience sur ces systèmes, pourrait être vue comme une application des propos tenus par Manuel DeLanda dans *non organic life*⁶³, où il met en valeur les différents comportements de la matière. Sur les vidéos du projet, on peut voir que Hansmeyer utilise la matière à l'état de phase visqueuse. Cet état autorise la matière à explorer de nombreuses combinaisons possibles. La matière envahit l'espace et s'auto-organise en fonction de la présence des attracteurs. Ici Hansmeyer ne travaille qu'avec une seule substance contenue dans les voxels. Plus on augmente le nombre de substances, plus les solutions vont interagir entre elles et créer de nouveaux états dynamiques de matières. Ainsi ce ne sera pas une matérialité inerte appliquée à une forme déjà conçue, mais des matériaux impliqués dans la genèse de la forme. Cette matière s'organise par elle-même, et c'est au concepteur de l'intégrer à son processus de conception.

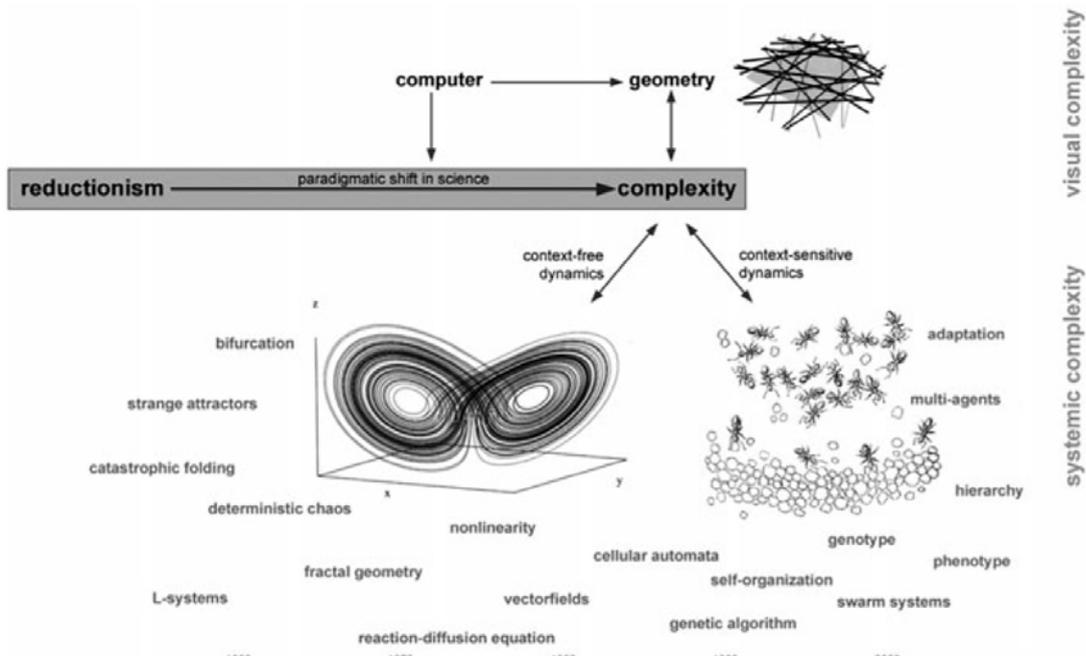
⁶¹ http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels_info2.html?screenSize=1&color=1 consulté le 09/06/2013

⁶² Images issues de <http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels>

⁶³ Delanda, M. *Non organic life*, in *Zone 6: Incorporation*, Jonathan Crary et Sanford Kwinter, 1992 pp 129-167

Conclusion : vers un nouvel usage des attracteurs

Les attracteurs étranges sont des systèmes chaotiques dynamiques dont les caractéristiques principales sont d'être composé d'un ensemble dense de point, d'être sensibles aux conditions initiales, et de s'auto-organiser spontanément. Ces caractéristiques spéciales leurs permettent d'obtenir une place particulière dans la conception d'architecture computationnelle expérimentale. Henri Poincaré à la fin du XIX et au début XX s'intéressait déjà à l'étude du comportement de systèmes définis par des équations différentielles. Cependant à l'époque, les attracteurs étranges étaient considérés comme trop complexes et une grande partie des personnes de l'époque ne comprenaient pas leurs fonctionnements, *Yet there are forms of irreducible complexity that display an elegance of their own, but which have been historically marginalised (until the second half of the 20th century) because of their unfamiliarity.*⁶⁴ Il a fallu attendre la seconde moitié du XXe siècle et le passage dans les sciences de la linéarité à la non-linéarité pour revoir un intérêt des scientifiques sur la question. Ce changement de paradigme a été rendu possible par le développement des ordinateurs qui ont permis de résoudre des équations complexes. Dans les années 60, le système d'équation utilisé par Lorenz était beaucoup trop compliqué à résoudre numériquement pour les ordinateurs de l'époque. En simplifiant ces équations et pour des paramètres spéciaux, il a pu mettre en évidence l'auto-organisation des structures dissipatives loin de l'équilibre. Finalement il aboutit à un système avec seulement trois degrés de liberté ce qui rendait possible le calcul par les ordinateurs mis à sa disposition. Sur le graphique ci-dessous issu d'un article de Toni Kotnik, on peut voir que les attracteurs étranges sont parmi les premiers objets mathématiques découverts qui illustrent le changement de paradigme évoqué précédemment.



Toni Kotnik, *changement de paradigme en physique et en mathématique dans le design digital*⁶⁵

⁶⁴ Delanda (M).- Material elegance op cit p 21

⁶⁵ Kotnik (T), Digital Architectural Design as Exploration of Computable Functions in International journal of architectural computing, issue 01, volume 08, Multi Science Publishing, Thursday, June 10, 2010, p3

Cependant à l'inverse d'autres systèmes comme les automates cellulaires ou les agents, l'utilisation des attracteurs étranges comme modèle génératif de projet reste très réduite, sûrement parce que leur usage est aujourd'hui encore très complexe. Il a fallu plus de 40 ans et le projet de Flotsam en 2005, pour que les équations qui définissent les attracteurs étranges soient utilisés comme génératrices de projets. Malgré ce projet, l'usage aujourd'hui dans le processus de conception architecturale des attracteurs, se limite majoritairement aux attracteurs simples. Pourtant comme nous l'avons vu précédemment, les attracteurs étranges présentent des caractéristiques intéressantes pouvant être utilisées par les architectes. Ils proposent une « esthétique de décision » car en fonction des paramètres définis par l'architecte, le système évoluera différemment. Cependant l'intérêt que doivent porter les architectes à ces objets mathématiques ne doit pas qu'être esthétique. Dans les projets que nous avons pu analyser, la forme produite est privilégiée à sa matérialisation. Les projets représentent l'évolution du système à un instant t . Plus qu'un intérêt formel, la matérialisation semble le nouvel enjeu à développer par les architectes et les ingénieurs pour intégrer les attracteurs étranges au processus de conception d'architecture computationnelle. Pour répondre aux questions situées au début de ce mémoire et notamment à la sous question 2.1 : *A quelle échelle travailler les attracteurs étranges ?* Je répondrai à l'échelle de la matière. Dans la nature, les attracteurs sont caractérisés par une matérialité plus « flexible/ volatile/ mobile » (la fumée de cigarette, le bassin d'un fleuve) qui perdurent seulement dans un temps très court. Une matérialité « élastique/compressible/ extensible/ malléable/ molle » conviendrait plus pour matérialiser la forme issue des attracteurs étranges à un temps t , $t-1$ et $t+1$. La forme serait comme une association temporelle des conditions passées. Les nuages de points qui composent les attracteurs étranges permettent en travaillant les relations entre les points d'expérimenter la matérialité d'un tel système et de passer d'un objet mathématique à un objet physique simulant les mêmes conditions. Ainsi le choix de l'architecte ne sera pas celui d'un système figé qui correspond à un instant t , mais à un système dynamique qui évolue en fonction du temps.

Annexes

Hypothèses de travail

Hypothèse n°1

Parmi la gamme étendue d'outils mathématiques/algorithmiques disponibles pour l'architecture computationnelle expérimentale, les attracteurs étranges découverts dans les années 1960, occupent une place particulière. A partir d'une même formule mathématique, les attracteurs étranges permettent une infinité de solutions. Ces solutions sont des objets mathématiques abstraits dont l'architecte dans sa conception du projet est libre d'en définir tous les paramètres. L'architecte se doit de mieux cerner les limites et potentialités de cet outil, d'en comprendre le fonctionnement, les raisons, les atouts et inconvénients pour la conception du projet.

Hypothèse n°2

La notion d'attracteur (étrange) apparaît dans certains livres et revues d'architectures comme nouvel outil pour la conception du projet (The Metapolis Dictionary of Advanced Architecture Architecture City, technology and society in the information âge (2003); The architecture of the jumping universe (1995) ; un article de Manuel DeLanda dans AD n°77 (2007)) et de façon plus discrète dans *S, M, L, XL* de Rem Koolhaas (1995) ; et *Informal* de Cecil Balmond (2002). Dans ces livres, les attracteurs sont évoqués beaucoup plus pour leurs qualités générales que pour leur réel fonctionnement mathématique et théorique. La notion d'attracteur est plus fortement utilisée dans de nombreux logiciels comme Grasshopper, les attracteurs sont alors limités à un ou plusieurs points qui modifient les paramètres d'un système en fonction de leurs positions. Si les « points attracteurs » font partie des opérations courantes utilisées lors de la conception architecturale assistée par ordinateur, les attracteurs étranges n'y figurent pas encore. A l'inverse des points attracteurs qui sont applicables à tous les projets, les attracteurs étranges possèdent un vocabulaire formel fort. Ils ne viennent pas se greffer à un projet, ils font le projet. On fera l'hypothèse dans ce travail que l'introduction de modélisations et simulations fondés sur l'utilisation d'attracteurs étranges apportera des bouleversements importants dans la conception de projets par les architectes et donc aussi dans les projets eux-mêmes.

Sources bibliographiques

Thermodynamique et chaos

Prigogine (I) ; Stengers, (I).- La nouvelle alliance. (Paris, Gallimard, Folio Essais, numéro 26, 1986, première édition 1979).

Prigogine (I) ; Stengers (I).- Entre le temps et l'éternité (Paris, Flammarion : Champs Sciences, 262, 2009)

Ruelle (D), Takens (F).-On the Nature of Turbulence (Bures-sur-Yvette, Comm. Math. Phys. Volume 20, Number 3, 1971) pp167-192.

Sardar(Z), Abrams(I).-Chaos for beginner (Duxford, Icon Book Ltd., 1998)

Sprott (J. C.).- Strange Attractors: Creating Patterns in Chaos. (New York, Henry Holt, 1993)

Sites internet consultés:

Delignières (D).-Système dynamique et morphogénèse in <http://didier.delignieres.perso.sfr.fr/> consulté le 01/11/2013

Sperber (F) ;Paris (R).- Qu'est ce que un attracteur étrange ? in <http://www.matierevolution.fr/spip.php?article706> citant Prigogine (I) ; Stengers (I).- Entre le temps et l'éternité

Sperber (F) ;Paris (R).- op cit, citant PRIGOGINE, Ilya et Isabelle STENGERS, *Entre le temps et l'éternité*, Paris, Flammarion, Coll. Champs, 1992

Wikipédia espace des phases: http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace_des_phases

Matérialité

Delanda (M).- Material elegance, in Elegance, in Architectural Design Vol°77, n°1, (London, Architectural Design, Academy Press, 2007) Ali Rahim, Hina Jamelle, editors pp18-23

Delanda (M).- Non organic life, in Zone 6: Incorporation, (Cambridge, MIT Presse, Jonathan Crary et Sanford Kwinter editors,1992) pp 129-167

DeLanda (M), Materiality : Anexact and Intense, in Lars Spuybroek, Machining Architecture Nox, London, Thames & Hudson, 2004,p370-377

Sites internet consultés:

Wikipédia transition de phase: http://fr.wikipedia.org/wiki/Transition_de_phase

Wikipédia colloïde : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Collo%C3%AFde>

Attracteur et architecture

Balmond (C).- Informal (Prestel Verlag, 2002)

Balmond (C), « New structure and the informal » in Architectural Design, »New science=New architecture ? »,vol 67 n°9/10 Septembre-Octobre 1997,

Collectif.- The Metapolis Dictionary of Advanced Architecture City, technology and society in the information age (Barcelone, Actar, 2003), sous la direction de Manuel Gausa.

Experiment in associative urbanisme, in Digital Cities, in "Architectural Design" Vol°79, n°4 (London, Wiley, 2009)

Franceschelli (S), Morphogenesis and dynamical systems, Imagine Math 2, Emmer M, 2013

Jencks (C).- The architecture of the jumping universe (Londres, Academy Edition, 1995)

Jencks (Ch)« Non linear architecture, *new science = new architecture ?*» publié dans Architectural Design, « New science=New architecture ? »,vol 67 n°9/10 Septembre-Octobre 1997

Interview de Patrik Schumacher par Peter Eisenman publiée in Log 28 Stocktaking, New York anyone Corporation, Summer 2013 p39-52

Quaderns, spirales, Collego d'arquitectos de Catalunya, Barcelona,1999

Tiezzi (E), *Steps Towards an Evolutionary Physics*, WIT Press, 2006 p104

Verebes (T).- Experiment in associative urbanisme, in Digital Cities, in"Architectural Design" Vol°79, n°4, (London, Architectural Design, Academy Press, 2009) Helen Castle editors pp 24-33

Sites internet consultés:

Site internet de Flotsam: <http://www.flotsam-uk.net/main.html>

Site internet de Michael Hansmeyer : http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels_info2.html?screenSize=1&color=1

Site internet de José Sanchez: <http://www.plethora-project.com/studio/>

Site internet de Steve Shaviro : <http://www.shaviro.com/Blog/?p=756>

Mots-clés de la recherche

NUAGES DE "TAGS" (ETIQUETTES)

Nuage Global réduit :

CHAOS/ DYNAMISME/ FRACTAL/ IRREVERSIBLE/ POINT/ TRAJECTOIRE

Nuage Global étendu :

ASSOCIER, CHEVAUCHEMENT (OVERLAP), CONNECTER/ **CHAOS/ DYNAMISME/ FORME/ FRACTAL/ GEOMETRIE/ HASARD/ LIMITE/ NATURE/ NON-FORME/ SANS ECHELLE/ POINT/ TRAJECTOIRE/ VECTEUR**

Nuage Global étendu organisé :

Auto-organisation :

Attracteur/ bifurcation/ catalyseur/ condition/ dissipation/ entropie/ équilibre/ rapport/ spontanée

Les mots clés ci-dessous sont issus de la définition des attracteurs dans *the metapolis dictionary of advanced architecture*⁶⁶. Ces notions ne se limitent pas à l'architecture, elles recoupent des domaines tels que les mathématiques, la physique ou la thermodynamique. Par leurs multiplicités, elles nous permettent d'obtenir une première définition des caractéristiques qui composent les attracteurs étranges.

A-scalarity :

AA/ ouvert/ accouplement/ auto similitude/ dichotomie/ entre/ extraversion (extravertie)/ fractal/ géométrie/ informelle/ intermédiaire, lieux/ limite/ non-forme/ sans échelle

Diagramme :

Abstraction/ balise/ concis/ connaissance/ critère/ digital/ directement/ duel(alite)/ extraversion/ carte de bataille/ non forme/ récursivité/ synthétique/ trajectoire

Dynamisme :

Action/ activation/ activité/ animation/ avancée/ avatar/ champ/ disposition/ environnement/ génétique de la forme/ instable/ inquiétude/ intelligence

Forme :

Action/ aformel/ animation/ architecture/ attracteurs/ hasard/ cadenas/ champ/ camouflage/ chaos/ cultures/ décision plus que design/ déploiement/ extraversion/ f111/ fractal/ génétique de la forme/ géométrie/ geste/ hybride/ informe/ inquiétude/ intermittence/ rien/ précision/ séquence/ signifiant/ trajectoire

⁶⁶ collectif.- The Metapolis Dictionary of Advanced Architecture City, technology and society in the information age (Barcelone, Actar, 2003), sous la direction de Manuel Gausa.

Fractal :

Ouvert/ attracteurs/ auto similitude/ hasard/ bourgeons/ complexité/ dynamisme/
géométrie/ indétermination/ nature/ séquence/ sans échelle/ système dynamique/
topologie/ trajectoire/ zoom

Géométrie :

Animation/ auto similitude/ cadenas/ champ/ déploiement/ élastique/ assemblage/
estampages/ forme/ fractal/ fragile/ hypertrophie/ informel/ lands in lands/ lave
programmatische/ mailles/ non formel/ séquence/ topologie/ trajectoire/ zapping/ zoom

Limite :

Ouvert/ a-scalarité/ attracteurs/ champ/ camouflage/ dynamisme/ architecture dissoute/
enlacement/ entre/ espace/ globalisation/ glocal/ logique diffuse/ lieux/ périphérie/
simultanéité/ télépolis/ vide/ vague

Taches d'encre :

Attracteur/ auto urbanisme/ champ/ cartographie/ ville ?/ dispersion/ disposition/
distribution/ architecture dissoute/ lieux de lieux/ carte/ Mr ville/ métapolis/ collage city/
territoire

Rien :

Action/ audace/ dynamisme/ forme/ infiltration/ passion/ vide

Sans échelle :

Auto similitude/ dimension/ un nain géant/ fractal/ hypertrophie/ macro-micro/ moiré/
rhizomatique / Sierpinsky/ zoom

Topologie :

Topologie/ état

Trajectoire :

Attracteurs/ boucle/ champ/ déploiement/ échec/ évolution/ fractal/ géométrie/ carte de
bataille/ topologie/ voyage

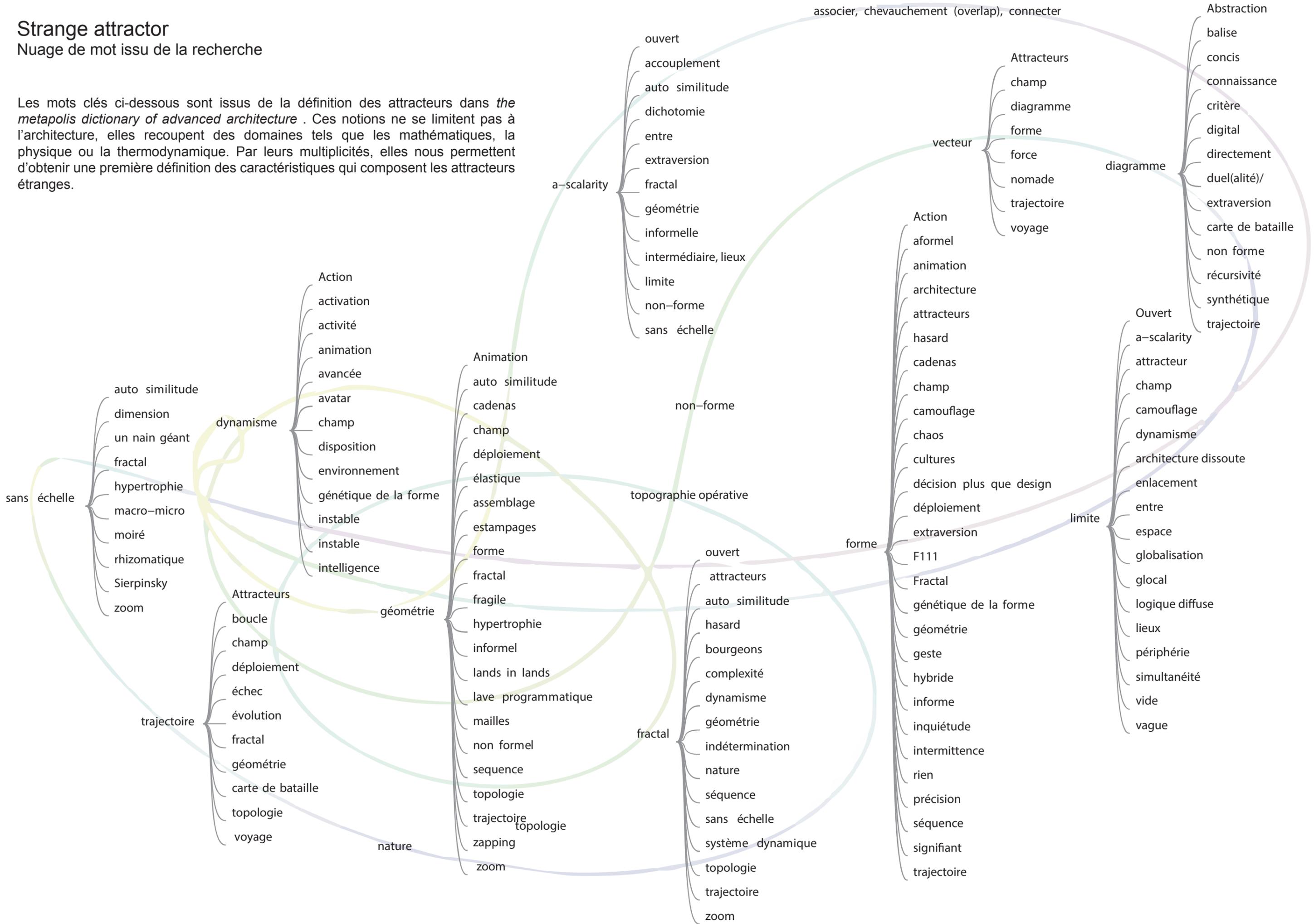
Vecteur :

Attracteurs/ champ/ diagramme/ forme/ force/ nomade/ trajectoire/ voyage

Strange attractor

Nuage de mot issu de la recherche

Les mots clés ci-dessous sont issus de la définition des attracteurs dans *the metapolis dictionary of advanced architecture*. Ces notions ne se limitent pas à l'architecture, elles recoupent des domaines tels que les mathématiques, la physique ou la thermodynamique. Par leurs multiplicités, elles nous permettent d'obtenir une première définition des caractéristiques qui composent les attracteurs étranges.



Exemples d'attracteurs étranges

La présentation qui suit est une énumération exhaustive de différents types d'attracteurs étranges. Les équations et les images proviennent du manuel d'utilisation de Chaoscope (logiciel de rendu d'attracteurs étranges).

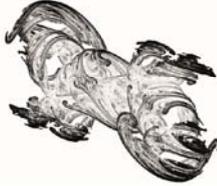
Image de l'attracteur (Les images représente une forme «typique» de chaque attracteur)	NOM Chercheur
	Nombres de paramètres
	Equation

	CHAOTIC FLOW Pr. Julien Sprott
	22 paramètres: M0, M1... M11, M0 Op., M1 Op.... M10 Op and dT
	Equation: $Op_i \in \{1, x, y, z\}$ $\dot{v} = v + d \begin{pmatrix} m_0 Op_0 & m_1 Op_1 & m_2 Op_2 \\ m_4 Op_4 & m_5 Op_5 & m_6 Op_6 \\ m_8 Op_8 & m_9 Op_9 & m_{10} Op_{10} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_3 \\ m_7 \\ m_{11} \end{pmatrix}$

	ICON Michael Field and Martin Golubitsky
	6 paramètres: Degree, Alpha, Beta, Lambda, Gamma and Omega
	Equation: $r \in \mathbb{C}$ $r = (x + iy)^d$ $p = \lambda + \alpha \ r\ + \beta (x \operatorname{Re} r - y \operatorname{Im} r)$ $\dot{x} = px + \gamma \operatorname{Re} r - \omega \gamma$ $\dot{y} = py - \gamma \operatorname{Im} r + \omega \alpha$ $\dot{z} = \ r\ $

	IFS Michael Barnsley
	Jusqu'à 128 paramètres: M rot., M sc., M sh., M tr., N rot., N sc., N sh., N tr., etc
	Equation: $\sum_{i=1}^n prob_i = 1$ $\dot{v} = \begin{pmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 & m_5 \\ m_6 & m_7 & m_8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_9 \\ m_{10} \\ m_{11} \end{pmatrix}$ or $\dot{v} = \begin{pmatrix} n_0 & n_1 & n_2 \\ n_3 & n_4 & n_5 \\ n_6 & n_7 & n_8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_9 \\ n_{10} \\ n_{11} \end{pmatrix}$ or...

Caractéristique: L'attracteur IFS a des propriétés fractales

	JULIA Alan Norton et plus tard John C. Hart
	4 paramètres: Level, Creal, Cimag and PhidT Equation: $z, c \in \mathbf{H}$ $\dot{z} = \sqrt{z - c}$

	LORENZ Edward Lorenz
	4 paramètres: A, B, C and dT Equation: $\dot{x} = x + ad(y - x)$ $\dot{y} = y + d(bx - y - zx)$ $\dot{z} = z + d(xy - cz)$

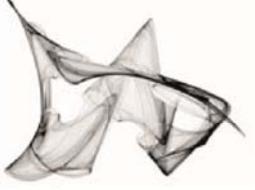
Caractéristique: L'attracteur de Lorenz avec sa morphologie caractéristique (entrelacement d'une boucle) est l'un des attracteurs les plus connus. Il démontre l'une des lois fondamentales de la théorie du chaos qui est la dépendance du système aux conditions initiales

	LORENZ-84 Edward Lorenz
	5 paramètres: A, B, F, G and dT Equation: $\dot{x} = x + d(-ax - y^2 - z^2 + af)$ $\dot{y} = y + d(-y + xy - bxz + g)$ $\dot{z} = z + d(-z + bxy + xz)$

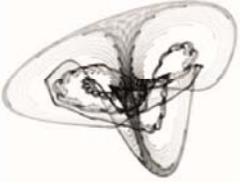
Caractéristique: Les deux équations précédentes ont été découvertes par Lorenz lorsqu'il étudiait le comportement de système météorologique.

	PICKOVER Clifford A. Pickover
	4 paramètres: A, B, C and D Equation: $\dot{x} = \sin ay - z \cos bx$ $\dot{y} = z \sin cx - \cos dy$ $\dot{z} = \sin x$

	POLYNOMIAL, TYPE A <u>Julien Sprott</u>
	<p>3 paramètres: P0, P1 and P2</p> <p>Equation:</p> $\begin{aligned} \dot{x} &= p_0 + y - zy \\ \dot{y} &= p_1 + z - xz \\ \dot{z} &= p_2 + x - yx \end{aligned}$

	POLYNOMIAL, TYPE B <u>Julien Sprott</u>
	<p>6 paramètres: P0, P1... P5</p> <p>Equation:</p> $\begin{aligned} \dot{x} &= p_0 + y - z(p_1 + y) \\ \dot{y} &= p_2 + z - x(p_3 + z) \\ \dot{z} &= p_4 + x - y(p_5 + x) \end{aligned}$

<p>Abs:</p> 	POLYNOMIAL, FUNCTION (Abs, Power and Sin) <u>Julien Sprott</u>	
		<p>21 à 39 paramètres: P0, P1... P38</p> <p>Equation:</p> <p>Abs:</p> $\begin{aligned} \dot{x} &= P_0 + P_1x + P_2y + P_3z + P_4 x + P_5 y + P_6 z \\ \dot{y} &= P_7 + P_8x + P_9y + P_{10}z + P_{11} x + P_{12} y + P_{13} z \\ \dot{z} &= P_{14} + P_{15}x + P_{16}y + P_{17}z + P_{18} x + P_{19} y + P_{20} z \end{aligned}$
		<p>Power:</p>  $\begin{aligned} \dot{x} &= P_0 + P_1x + P_2y + P_3z + P_4 x + P_5 y + P_6 z ^{P_7} \\ \dot{y} &= P_8 + P_9x + P_{10}y + P_{11}z + P_{12} x + P_{13} y + P_{14} z ^{P_{15}} \\ \dot{z} &= P_{16} + P_{17}x + P_{18}y + P_{19}z + P_{20} x + P_{21} y + P_{22} z ^{P_{23}} \end{aligned}$
<p>Sin:</p>  $\begin{aligned} \dot{x} &= P_0 + P_1x + P_2y + P_3z + P_4 \sin(P_5 P_6 x) + P_7 \sin(P_8 P_9 y) + P_{10} \sin(P_{11} P_{12} z) \\ \dot{y} &= P_{13} + P_{14}x + P_{15}y + P_{16}z + P_{17} \sin(P_{18} P_{19} x) + P_{20} \sin(P_{21} P_{22} y) + P_{23} \sin(P_{24} P_{25} z) \\ \dot{z} &= P_{26} + P_{27}x + P_{28}y + P_{29}z + P_{30} \sin(P_{31} P_{32} x) + P_{33} \sin(P_{34} P_{35} y) + P_{36} \sin(P_{37} P_{38} z) \end{aligned}$		

	<p>POLYNOMIAL, SPROTT Julien Sprott</p>
	<p>Jusqu'à 168 paramètres: P0, P1... P167</p> <p>Equation:</p> <p>(equation for the 2nd order)</p> $\dot{x} = P_0 + P_1x + P_2x^2 + P_3xy + P_4xz + P_5y + P_6y^2 + P_7yz + P_8z + P_9z^2$ $\dot{y} = P_{10} + P_{11}x + P_{12}x^2 + P_{13}xy + P_{14}xz + P_{15}y + P_{16}y^2 + P_{17}yz + P_{18}z + P_{19}z^2$ $\dot{z} = P_{20} + P_{21}x + P_{22}x^2 + P_{23}xy + P_{24}xz + P_{25}y + P_{26}y^2 + P_{27}yz + P_{28}z + P_{29}z^2$

Caractéristique: Equation très complexe qui autorise plus de 20^{30} combinaisons.