

Revue Internationale de

ISSN 0980-1472

systemique

Vol. 7, N° **3**, 1993

afcet

DUNOD

AFSCET

Revue Internationale de
systemique

Revue
Internationale
de Sytémique

volume 07, numéro 3, pages 263 - 294, 1993

Contribution du concept de labyrinthe
à la théorie des systèmes

Claude Lefèvre

Numérisation Afscet, août 2017.



Creative Commons

l'une s'actualisant pendant que l'autre se virtualisait) que sa situation définitive (mais on ne sait pas de qui il va être le serviteur exclusif). Nous voilà très loin en apparence du « nid d'oiseau », mais ce mythe arlequinnesque s'insère dans une problématique qui leur est commune, de même que le « nid d'oiseau » n'est là que pour nous introduire par un biais étrange à ce type de recherches.

29. On se reportera à la note 10 où nous suggérons que nous passons très souvent dans le méta-modèle (*l'En-Sof*), pour des fonctions aussi variées que la création, l'innovation, peut-être aussi le processus de l'« énonciation » en général (*Précis de Systémique Ago-Antagonistes*, pp. 62 sqq.) ou, comme il en est question ici, celui du choix et de la désignation en tant que « réduction de la fonction d'onde » ou actualisation d'une virtualité sur deux. De plus, si l'on prend le cas simple de deux oiseaux, la désignation comme « hol » de l'un s'accompagne « simultanément » de la désignation de l'autre comme « hol » si il s'agit d'un sacrifice de type V ou de la désignation de l'autre comme « exp » s'il s'agit d'un sacrifice de type P (plus exactement il faudrait dire, d'après la note 20, qu'en désignant un oiseau comme « hol », l'autre devient « immédiatement » un oiseau désigné « hol », et que dans le cas où la première désignation est « exp », la « seconde » est encore « hol ») (et dans ce dernier cas, les deux oiseaux devraient, on l'a dit, avoir été mis dans deux paniers différents, sous peine d'élimination du couple). On retrouve donc la métaphore de la non-séparabilité dans *Kinnin* telle qu'elle avait été évoquée à propos des deux oiseaux du sacrifice de purification du lépreux quand on commenta la désignation aléatoire de l'oiseau qui va s'envoler et de celui qui va être sacrifié.

CONTRIBUTION DU CONCEPT DE LABYRINTHE À LA THÉORIE DES SYSTÈMES

Claude LEFÈVRE

Résumé

Dans cet article nous nous sommes surtout essentiellement attachés à résoudre, dans certains cas, le problème du déchiffrement d'un système, lequel, on le sait, constitue un tout indissociable dont ni les parties ni les influences directes entre éléments ne sont isolables, d'où la difficulté d'en retrouver l'organisation interne à partir des manifestations diverses qu'il offre.

Nous avons également tenté, par des moyens informatiques, de simuler le fonctionnement d'un système auto-organisateur capable d'engendrer des structures emboîtées les unes dans les autres, analogues à celles que l'on rencontre dans la nature (structures où interviennent une part de hasard et une part de nécessité).

Abstract

In this paper, we especially tried to solve, in some cases, the problem of the deciphering of a system which, we know, constitutes an indissociable whole, in which it is impossible to isolate either the parts or the direct influences between elements, hence the difficulty to rediscover its internal organization from the various aspects it shows.

We also tried to simulate, by the means of data processing, the functioning of a self-organizing system able to generate structures, which are fitted one in another, like those met in nature (structures where both chance and an internal necessity occur).

I - INTRODUCTION

Nous tenons à dire combien, pour la rédaction des paragraphes VII à VIII inclus, nous sommes redevables au petit livre de Yona Friedman, *Utopies réalisables*, (1975). Nombre de concepts, de définitions rencontrés

Professeur à l'I.U.T. de Lannion.

Rev. intern. systémique. 0980-1472 Vol. 7/93/03/ 263 /32/\$ 4.00/© Afcet Gauthier-Villars

sont souvent inspirés ou dérivés plus ou moins directement d'idées présentes dans cet ouvrage, qui nous a ainsi donné l'impulsion.

Cet article n'est qu'une modeste contribution à la théorie des systèmes, laquelle n'est pas sans rapport, nous allons le voir, avec celle des labyrinthes sur lesquels nous avons longuement travaillé. En effet les divers embranchements d'un labyrinthe peuvent être vus comme les lieux d'éléments interconnectés d'un système ; la liaison entre les différents éléments considérés étant figurée par des couloirs orientés, censés canaliser les influences s'exerçant d'un élément à l'autre.

Ce point de vue a été pour nous l'occasion de nous interroger sur le *degré de hiérarchisation d'un système* (supposé alors structuré à un seul niveau) ou du labyrinthe associé. De manière un peu simplifiée on peut dire que, plus l'organisation topologique du labyrinthe penche du côté d'une structure arborescente, plus le système est considéré hiérarchique. Plus elle s'apparente à un réseau, moins le système est hiérarchique, tous les cas intermédiaires possibles étant évidemment envisageables.

Il est possible aussi d'attacher à chaque élément d'un système une « *situation hiérarchique* », en première approximation d'autant plus élevée qu'il se trouve situé plus près du pied d'une arborescence et plus loin d'une ramification terminale, c'est-à-dire qu'il exerce plus d'influences qu'il n'en reçoit. Nous avons aussi introduit, surtout pour les systèmes sociaux, une « loi de dégradation » des dites influences en fonction du nombre d'intermédiaires nécessaires à leur acheminement. Ce nombre d'intermédiaires est souvent un élément important : s'il est trop élevé, l'influence transmise risque alors de s'évanouir en chemin, ou d'arriver trop tard, ou à contre-temps...

Une autre de nos préoccupations a aussi été d'étudier l'évolution de la structure du système (et du labyrinthe associé) en présence de « *bruit* », c'est-à-dire de *perturbations susceptibles d'affecter la topologie*, ou encore la distribution de « stimuli orienteurs » (attractifs ou répulsifs) supposés canaliser plus ou moins fortement l'écoulement des influences à l'intérieur du système. Cette loi d'évolution du système dépend des *lois de réorganisations intrinsèques* relatives à l'écoulement des influences à l'intérieur de celui-ci. Nous entendons par là des lois de modification de la topologie et de redistribution des « stimuli orienteurs », dans l'éventualité de couloirs qui se rompent ou d'embranchements qui disparaissent, de « portes » qui s'ouvrent ou se ferment, de petits efforts (ouvrir la porte) pouvant produire de grands effets sur la topologie et la distribution des flux d'écoulement des influences.

On peut aussi imaginer comme moteur interne d'évolution une « sorte de loi concurrentielle » entre des éléments qui tendent à éliminer d'autres

éléments pour, par exemple, voir s'élever leur situation hiérarchique, en admettant que celle-ci leur soit transparente... Compte tenu de l'introduction, par exemple, de cette loi concurrentielle (souvent à l'œuvre dans les systèmes sociaux), on peut là encore avoir des indications sur l'évolution du système ou du labyrinthe associé.

Ces lois ne concernaient jusqu'ici que des labyrinthes possédant un seul niveau. À la fin du présent article, il est question de l'autogenèse de systèmes possédant des niveaux de structuration multiples, c'est-à-dire des « tous » composés de parties, lesquelles à leur tour sont des tous composés de parties, en une suite progressive de plus en plus complexe.

Comment la nature fait-elle pour sécréter de telles structures étagées et emboîtées les unes au autres ? Telle est la question à laquelle nous avons essayé de répondre en tentant de dégager les principes de base et de construire des algorithmes capables de générer de telles organisations.

II - LE LABYRINTHE COMME ARCHÉTYPE DE L'ESPACE CONTRAINT

Ce *travail* sur la théorie des systèmes intervient après une étude sur les *labyrinthes concrets* de notre environnement, le mot labyrinthe étant pris sous son aspect de suite de couloirs débouchant les uns dans les autres et qui *contraignent* le mouvement.

Notre angle d'approche n'a cessé d'être celui de la *simulation informatique* : il est très différent de celui de la psychologie animale.

Le labyrinthe est vu comme une sorte de *graphe* (au sens mathématique du terme). Dans une déambulation ont été prises en compte non seulement la topologie, c'est-à-dire les règles d'enchaînement possibles des différents carrefours, mais encore tous les *éléments perceptifs* (conscients ou inconscients) rencontrés par la particule mobile le long des corridors, *éléments attractifs* ou *répulsifs*, ayant une incidence en particulier sur le *coût généralisé* de parcours, mais encore pouvant infléchir voire dicter le déroulement des trajectoires elles-mêmes.

III - LE LABYRINTHE GÉNÉRALISÉ ET LE CONCEPT D'INTRICATION

A l'aide du concept dit d'intrication nous avons généralisé le concept de mobilité contrainte, ainsi que les autres concepts introduits, à des

structures labyrinthiques non spatiales, c'est-à-dire à des *labyrinthes abstraits, immatériels*.

III.1. Le concept d'intrication : ses différents aspects

Le concept d'*intrication* que nous avons introduit a un caractère très général : il exprime le *lien orienté* entre des entités distinctes et dépendantes. Ce lien, plus ou moins fort, constitue un *code particulier de description du monde*. Il peut être de nature très diverse : influence entre les éléments interconnectés d'un système, association, régularité statistique entre phénomènes, causalité plus ou moins diffuse. Le concept d'intrication est ainsi souvent situé à mi-chemin entre l'implication mathématique et l'association, voire l'analogie ou la ressemblance : intrication des faits, des actes, des grains de connaissance (*culturèmes*), des théories (formes stables de déductivité). Cette intrication attachée souvent à un *déterminisme flou* (ou simplement à des régularités statistiques) est donc de nature plus ou moins lâche, plus ou moins rigide.

III.2. Le concept d'intrication appliqué à un ensemble d'éléments interconnectés

Cette notion d'intrication peut en particulier être utilisée pour relier les éléments interconnectés d'un *système*, qu'il soit physique, chimique, ou social, etc. Plutôt que d'intrication entre les différents éléments du système entre eux nous parlerons alors plutôt d'*influence*. A un tel système on peut bien sûr encore faire correspondre un labyrinthe abstrait, les différents embranchements étant associés aux éléments interconnectés évoqués, et les « couloirs » étant censés canaliser les dites influences à l'intérieur du système considéré. Nous avons résolu dans certains cas le difficile problème du *déchiffrement d'un système*, lequel constitue on le sait un tout indissociable, dont ni les parties, ni les influences directes ne sont *isolables*, d'où la difficulté à en retrouver l'*organisation interne* précise à partir des manifestations diverses qu'il offre... Notre point de départ est généralement la donnée de corrélations binaires ou digrammatiques portant sur chaque couple d'éléments de ce système (on agit sur A par exemple et on observe les réactions des autres éléments, ou du moins la fréquence de ces réactions). Chacune de ces corrélations prend en compte les *propagations à la fois directes et indirectes* des influences entre chaque élément de la paire considérée. À partir de la connaissance de l'ensemble de toutes

ces corrélations digrammatiques, un algorithme est capable, dans certains cas, de *proposer un modèle d'organisation interne* qui rende compte du fonctionnement de l'ensemble.

III.3. Vers une représentation du monde comme une succession de labyrinthes emboîtés à différents niveaux

À un *pan de connaissances* plus ou moins intriquées entre elles peut être associé un *réseau d'interconnexions, un labyrinthe abstrait*.

Des pans de connaissances (des théories par exemple, c'est-à-dire des formes stables de déductivité) peuvent à leur tour être intriqués entre eux. Ils constituent alors les nœuds d'un *méta-réseau* auquel correspond un nouveau labyrinthe, d'où une représentation du monde comme une succession de *labyrinthes emboîtés* les uns aux autres à la façon des poupées gigognes (architecture de la complexité). Certains de ces labyrinthes sont associés à des micro-connaissances, d'autres à des macro-connaissances...

IV - CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA THÉORIE DES SYSTÈMES

On peut définir la notion de système, comme un complexe d'éléments en interaction. Au cours de ces dernières décennies, nous avons assisté à l'émergence du « système » comme concept-clef de la recherche scientifique. Bien sûr, les systèmes ont été étudiés depuis des siècles, mais quelque chose de nouveau a été ajouté. La tendance à analyser les systèmes comme un tout plutôt que comme une agrégation de parties, est compatible avec le penchant de la science contemporaine à ne plus isoler les phénomènes dans des contextes étroitement confinés, à ne plus décortiquer les interactions avant de les examiner, en bref à *regarder des tranches de nature de plus en plus larges*.

Selon Bertalanffy, (Bertalanffy, 1973) « Le problème qui se pose en fait pour les systèmes est essentiellement celui des limites de la procédure analytique appliquée à la science ». « Procédure analytique » signifie qu'on peut réduire à des parties l'être étudié et que par conséquent, on peut le reconstituer à partir de celle-ci, ceci aussi bien au sens matériel qu'au sens conceptuel. C'est le principe fondamental de la science « classique », exprimé de manières diverses : résolution en chaînes causales isolables, recherche d'unités « atomiques » dans les divers domaines de la science, etc. Les

progrès de la science ont montré que les principes de la science classique énoncés par Galilée et Descartes, expliquaient très bien un grand nombre de phénomènes. L'application de la procédure analytique dépend de deux conditions :

- la première est que les interactions entre les parties soient inexistantes ou assez faibles pour être négligées dans certaines recherches. Sous cette condition seulement, les parties pourront être « isolées » véritablement, logiquement, mathématiquement, puis ensuite réunies ;

- la seconde est que les relations qui décrivent le comportement des parties soient *linéaires* ; dans ce cas seulement on aura la *condition de sommativité*, c'est-à-dire que l'équation qui décrit le comportement de l'ensemble a la même forme que celles qui décrivent le comportement des parties ; les processus partiels peuvent être superposés pour obtenir le processus total, etc.

Ces conditions ne sont pas remplies par ces êtres que l'on appelle systèmes, c'est-à-dire formés de parties en « interaction » totale.

En résumé, on peut dire que les caractéristiques constitutives de tout système ne peuvent s'expliquer à partir de caractéristiques des parties prises isolément, d'où l'expression banale et un peu ésotérique : « le tout est plus que la somme des parties ».

L'idée de totalité donc est cruciale. Cette idée qui avait souvent fait surface dans l'histoire de la philosophie s'était épanouie dans la philosophie romantique et surtout chez Hegel. Elle a surgi parfois dans les sciences contemporaines comme dans la théorie de la forme ou *Gestalt*. Celle-ci a insisté sur la *notion de champ* qui commande la formation de totalités non additives.

Ces quelques lignes nous montrent la généralité de la notion de système. Elles nous incitent, si l'on veut appréhender un tant soit peu le réel, à *rechercher des modèles* (aussi pauvres soient-ils), des principes et des lois qui s'appliquent aux systèmes en général (ou à leurs sous-systèmes), qui ne tiennent pas compte de leurs caractéristiques particulières de la nature de leurs éléments ou du type de relations ou de « forces » entre ceux-ci. Certains se demandent si la notion de système n'est justement pas trop générale dans son universalité, trop particulière dans sa diversité pour être féconde...

N'est-elle pas triviale et seulement triviale ? Quand on dit : « tout interfère sur tout », on profère une vérité qui n'est guère opérationnelle, qui ne donne pas prise sur les choses : un « gouffre de généralité » guette la théorie des systèmes... Peut-il y avoir vraiment des principes systémiques à la fois

fondamentaux, originaux et non triviaux ? C'est à cette question que nous allons essayer d'apporter des éléments de réponse.

Il existe déjà en fait de nombreuses approches permettant de traiter des problèmes relatifs à la notion de système. Ce sont des démarches hétérogènes du point de vue logique, qui représentent des modèles conceptuels différents, des techniques mathématiques diverses, des points de vue complémentaires, etc. Notre propos sera de faire appel à une technique particulière qui s'apparente à la fois à la théorie des graphes et aux processus de Markov. Beaucoup de problèmes posés par les systèmes portent en effet sur les *propriétés structurelles ou topologiques* plutôt que les relations quantitatives, d'où le recours à la théorie des graphes, qui élabore des relations structurelles en les représentant dans un espace topologique. Toutefois l'aspect quantitatif est aussi pris en compte par le biais des processus de Markov associés avec le concept d'intrication défini précédemment.

V - PRÉCISION SUR LES TYPES DE SYSTÈMES JUSTICIALES DE NOTRE ÉTUDE, SCHÉMAS REPRÉSENTATIFS ASSOCIÉS

Nous appellerons système un ensemble d'éléments quelconques A, B, C, etc., qui peuvent par exemple être constitués soit des organes d'une machine, soit de corps physiques ou chimiques ou encore par les individus d'un corps social, etc., éléments susceptibles d'interagir les uns avec les autres avec des temps de réaction et des intensités de réaction décelables, intensités qui généralement se dégradent en fonction du nombre d'intermédiaires nécessaires à leur acheminement.

Les systèmes que nous nous proposons d'étudier devant pouvoir s'appliquer aux sciences sociales, aux sciences du vague de manière plus générale, ne seront *pas strictement déterministes*. Toute influence émanant de A est supposée s'acheminer, directement ou indirectement, vers B avec une fréquence d'occurrence F_{AB} fixe et repérable ou avec un temps moyen μ_{AB} de réaction observable (cette réaction n'est généralement pas instantanée et dépend par exemple du nombre d'intermédiaires nécessaires à son acheminement).

En bref, nous appellerons donc système un ensemble d'éléments découpés plus ou moins artificiellement dans l'univers et qui sont supposés interagir les uns sur les autres ; un élément qui n'aurait apparemment aucune relation avec un autre élément du système étant considéré hors de celui-ci. Autrement dit il

y a le système et le reste de l'univers (il y a une différence entre un système et son environnement comme dans la relation figure/fond des gestaltistes)...

Les interactions déjà évoquées sont donc supposées concerner des grandeurs associées aux différents éléments du système (ou variations de grandeur) perceptibles ou accessibles à la mesure ou à l'observation. Ces interactions doivent par ailleurs être *reproductibles* statistiquement, c'est-à-dire que *l'histoire passée du système doit demeurer sans effet sensible, sans influence sur le comportement statistique présent* (il s'agit donc au départ de systèmes sans mémoire, donc sans état interne, qui sont donc incapables d'évoluer, de s'autostructurer sauf en cas de grande perturbation externe. Nous y reviendrons. Insistons sur le fait que rien n'empêche à des éléments (périphériques en général) hors système de jouer un rôle de véhicule ; mais le rôle de ces éléments externes, s'il existe, est supposé, en raison de leur passivité apparente, indécélable. Ceci montre donc que rien n'interdit au système d'être ouvert (en conformité avec le réel où tout interfère sur tout) sur le reste de l'univers ; mais l'attitude adoptée procède du « *tout se passe comme s'il était fermé* », quitte à inventer des *couplages ou liaisons* arbitraires mais intérieures au système considéré, qui tout en conservant l'apparence de la fermeture, donnent un modèle explicatif plausible de son fonctionnement.

En résumé, et *de manière moins abstraite*, nous avons appelé système, un ensemble assez particulier d'éléments (des individus, dans le cas d'un système social) entre lesquels existe une relation quelconque. Un élément qui n'aurait aucune relation avec au moins un autre élément appartenant à ce système peut être considéré comme hors système.

Pour *donner une image simplifiée de ce système*, on peut représenter les éléments par des points (ou des croix) et les relations directes entre deux éléments par des lignes (ou flèches) reliant les deux éléments considérés. On obtient alors une figure composée de points et de lignes (ou flèches) dans laquelle un chemin au moins reliera n'importe quel couple de points arbitrairement choisis. Le mathématicien appelle cette figure un *graphe connexe*.

Si dans un système social par exemple, on observe deux personnes qui sont en communication (c'est-à-dire entre lesquelles il existe une relation), nous pouvons voir qu'une fois la communication terminée, l'une ou l'autre (ou les deux) changera son comportement préalable à la communication.

Nous dirons, dans ce cas que, l'une des personnes (ou les deux) a reçu une influence de la part de l'autre. Cette influence a une direction et peut-être représentée par une flèche qui part de celui qui exerce l'influence vers celui qui la reçoit. Il en sera ainsi de tout système où une relation, une

influence entre deux éléments présente une direction de propagation. Le graphe représentatif sera donc, non seulement connexe, mais *orienté*.

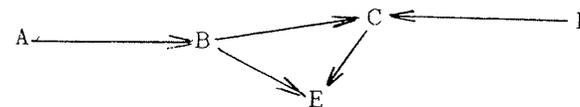


Figure 1.

Le schéma précédent condense (dans un espace topologique) les informations concernant seulement *l'organisation structurelle* du système. Ces caractéristiques structurelles ne se réfèrent en rien à des grandeurs mesurables et en particulier ne fournissent pas d'information sur l'importance, les intensités des influences. Pour prendre en compte, dans ce schéma, l'aspect quantitatif dû précisément à ces *intensités*, nous avons décidé de rajouter sur les flèches du graphe, un certain *nombre de chevrons*, nombre qui est *fonction croissante de l'intensité* ou force de l'influence directe associée, et dont la direction indique évidemment le sens de la propagation de cette dernière.

En toute rigueur l'interprétation qui doit être faite de ces chevrons est un peu plus subtile, leur présence indiquant en réalité la manière dont se distribuent statistiquement les influences directes d'un élément de A vers les autres, et vers lui-même...

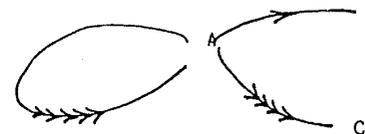


Figure 2. Un réseau partiel d'influences directes entre éléments A, B, C d'un système. Plus il y a de chevrons sur un « couloir » plus ce couloir est censé véhiculer souvent cette influence.

Ainsi dans le schéma de la figure 2 ci-dessus le nombre de chevrons dirigés de A vers tout élément X relié à A est par convention proportionnel à la probabilité P_{AX} pour qu'une influence directe partant de A s'achemine vers X (n chevrons si $P_{AX} = n/10$).

La probabilité P_{AA} pour que l'influence partant de A revienne vers lui-même, va dans le sens d'une réduction du bilan global des influences de A sur les autres (d'une manière lapidaire on peut dire que pendant que A influence lui-même il n'influence pas les autres...). Il s'agit d'un *artifice mathématique* qui doit donc être interprété dans le sens d'un affaiblissement des influences

directes $A \rightarrow B$ et $A \rightarrow C$. Cet artifice a été introduit afin de pouvoir traiter les systèmes envisagés comme des processus de Markov.

Ce recours – un peu artificiel – à des processus de Markov va nous permettre, entre autres, à partir d'une collection d'observations faites sur certains systèmes de conjecturer de leur organisation interne.

Autrement dit, nous allons d'abord, à partir d'un *ensemble d'observations* relatives au système considéré, tenter de *trouver un modèle de son organisation structurelle interne*, modèle compatible autant que possible avec les observations faites, et qui de surcroît respecte l'exigence de cohérence interne. En effet, dans un système, la cohérence interne des interconnexions entre les éléments détermine la structure du tissu tout entier.

Rappelons que si l'influence (directe ou indirecte) $A \rightarrow B$ nous apparaît faible, ou du moins éloignée temporairement, c'est que :

a/ La chaîne d'influences qui relie A à B est longue : l'éloignement de l'effet à la cause contribue à diminuer l'importance du phénomène $A \rightarrow B$ (dégradation des influences en fonction du nombre d'intermédiaires à leur acheminement).

b/ L'occurrence d'un cheminement des influences de A vers B est faible car l'influence exercée par A s'exerce, « s'écoule » plus volontiers (c'est-à-dire avec un plus haut degré de probabilité) vers C que vers B.

Les deux aspects a/ et b/ peuvent évidemment être cumulés.

NB : La suite un peu technique de ce paragraphe peut être omise en première lecture.

Il nous faut donc établir une formule permettant de calculer l'intrication (ou force d'intrication) *moyenne* F_{ij} entre l'élément A_i de départ et l'élément d'arrivée A_j , force qui *croît* en fonction :

- du nombre de voies directes ou indirectes qui conduisent de A_i vers A_j ;
- de la probabilité d'occurrence $p_{ij}(n)$ de chacune de ces voies ;
- en raison inverse de la *longueur* n de chacune de ces voies.

Le nombre de voies dépend lui-même de la *distance de cohérence* d , c'est-à-dire de « l'éloignement causal » maximum envisagé, on peut dire aussi de la « transparence » acquise sur le réseau s'il est causal (ou, ce qui revient au même, de la loi de dégradation de l'intrication en fonction du nombre d'intermédiaires à son acheminement).

Tout ceci peut être précisé en faisant un peu de mathématiques. Nous désignons donc par *force moyenne d'intrication* $F_{ij}(d)$ (ou encore par *intensité moyenne d'influence* $I_{ij}(d)$ de i vers j), la moyenne des forces d'intrication (ou d'influence) partielles $\pi_{ij}(n)$, où n désigne la longueur

d'un des chemins possibles de i vers j . Cette moyenne est pondérée par la probabilité d'occurrence $p_{ij}(n)$ d'un *chemin de longueur* n partant de i et rejoignant j pour la première fois :

$$F_{ij}(d) = I_{ij}(d) = \sum_{n=1 \text{ à } d} p_{ij}(n) \cdot \pi_{ij}(n),$$

où \sum désigne la sommation pour n allant de 1 à d (d =nombre maximum de chaînons intermédiaires).

L'intrication ou influence élémentaire $\pi_{ij}(n)$ de i vers j pouvant se dégrader (s'atténuer) en fonction de la longueur n de ce chemin (semi transitivité de l'intrication) nous avons adopté une loi en $1/n^\alpha$, où α désigne un coefficient d'autant plus grand que cette dégradation est rapide.

Finalement :

$$F_{ij}(d) = I_{ij}(d) = \sum_{n=1 \text{ à } d} p_{ij}(n) \cdot (1/n^\alpha). \quad (1)$$

Si $F_{ij}(d)$ est une valeur proche de celle obtenue pour $d = \infty$ on écrira simplement F_{ij} ou I_{ij} (c'est pratiquement le cas pour $d=10$ dans l'exemple de la figure 4 quand α est de l'ordre de 0,25).

Cas particulier : $\alpha = -1$

$F_{ij}(d)$ représente la « distance » moyenne d'intrication notée $\mu_{ij}(d)$.

Si $d = \infty$, alors $\mu_{ij}(\infty)$ noté μ_{ij} représente le « temps moyen » ou plutôt le nombre de chaînons moyens pour arriver pour la première fois en j partant de i .

VI - PASSAGE D'UNE MATRICE DES DISTANCES MOYENNES D'INFLUENCE PERÇUES AU RÉSEAU RELATIONNEL CHARGÉ D'EN RENDRE COMPTE. DÉCHIFFRAGE D'UN SYSTÈME

Nous avons résolu dans certains cas le difficile problème du *déchiffrage d'un système*, lequel constitue on le sait un tout indissociable, dont ni les parties, ni les influences directes ne sont *isolables*, d'où la difficulté à en retrouver l'*organisation interne* précise à partir des manifestations diverses qu'il offre... Notre point de départ est la donnée de corrélations binaires ou digrammatiques portant sur chaque couple d'éléments de ce système (on agit sur A par exemple et on observe les réactions des autres éléments, ou du moins la fréquence de ces réactions). Chacune de ces corrélations prend

Les calculs sont également automatisés à l'aide d'un programme informatique.

VII - SITUATION HIÉRARCHIQUE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS D'UN SYSTÈME STRUCTURÉ A UN SEUL NIVEAU

Il est naturel de définir la situation hiérarchique d'un élément n°i d'un système (surtout si c'est un système social) comme étant un paramètre numérique S_i d'autant plus grand que cet élément influence beaucoup les autres en se laissant peu influencer lui-même.

La situation hiérarchique S_i de l'élément n°i peut donc être définie comme étant la différence entre :

a/ la somme des intensités moyennes d'influence I_{ij} exercées par i sur les autres et :

b/ la somme des intensités moyennes d'influence I_{ji} reçues par i des autres.

$$S_i = \sum_{j, j \neq i} I_{ij} - \sum_{j, j \neq i} I_{ji},$$

où le symbole \sum indique la sommation par rapport à j (lequel reste différent de i) et I_{ij} désigne la force ou intensité moyenne d'influence de i vers j définie déjà au V.

VII.1. Hiérarchie du système associé à la figure 3 avec une loi de dégradation des influences en $1/n$ ($\alpha = 1$)

La somme des influences émises par l'élément n°1 vers les autres est :

$$I_{12} + I_{13} + I_{14} = 0,367 + 0,303 + 0,322 = 0,992.$$

La somme des influences reçues par le même élément est :

$$I_{21} + I_{31} + I_{41} = 0,253 + 0,386 + 1 = 1,639.$$

Il s'ensuit que la situation hiérarchique de l'élément n°1 est :

$$S_1 = 0,992 - 1,639 = -0,648.$$

Cette situation hiérarchique est négative puisque l'élément n°1 reçoit plus d'influences qu'il n'en exerce.

On démontrerait aisément que les autres éléments ont les situations hiérarchiques suivantes :

$$S_2 = 0,423 ; \quad S_3 = 0,180 ; \quad S_4 = 0,046.$$

La hiérarchie du système s'établit donc de la manière suivante par ordre décroissant : S_2, S_3, S_4, S_1 .

VII.2. Hiérarchie du système associé à la figure 3 avec une loi en $1/n^2$

Avec une telle loi la hiérarchie par ordre décroissant s'écrit alors : S_2, S_4, S_3, S_1 .

VII.3. Un exemple de système très hiérarchisé

Par exemple, à une arborescence du type ci-dessous correspondra un certain type de système (ou de société s'il s'agit d'un système social) que nous appellerons hiérarchique par opposition à celui de la figure 6 qui est égalitaire.

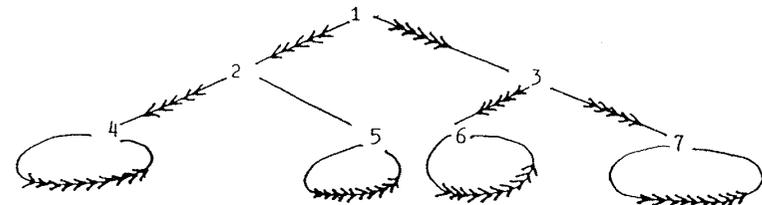


Figure 5. Réseau des influences directes dans un système très hiérarchisé.

Toutes les probabilités de transit associées à ce graphe sont nulles sauf :

$$P_{12} = P_{13} = P_{24} = P_{25} = P_{36} = P_{37} = 0,5 \quad \text{et} \quad P_{44} = P_{55} = P_{77} = 1.$$

La liste des situations hiérarchiques des différents éléments de ce système, calculée avec le même programme s'écrit :

Situation hiérarchique des éléments 1 : 1,5 ;

Situation hiérarchique des éléments 2 et 3 : 0,5 ;

Situation hiérarchique des éléments 4, 5, 6, 7 : -0,6.

On vérifie, ainsi qu'on pouvait aisément le prévoir, que l'élément n°1 occupe le sommet de la hiérarchie, ceci devant les éléments n°2 et n°3

ex-aequo. En bas de la hiérarchie se trouvent, au même niveau, les éléments terminaux de l'arborescence, à savoir les éléments n^{os} 4, 5, 6, et 7.

VII.4. Système égalitaire

Les mêmes calculs peuvent être réitérés en ce qui concerne un autre type de système ou de société que nous appellerons *égalitaire* et dont la structure est du type illustré dans le schéma de la figure 6.

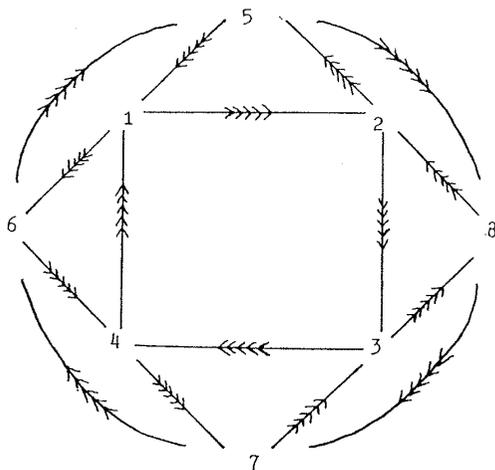


Figure 6. Réseau des influences directes dans un système égalitaire.

D'abord toutes les probabilités de transit sont nulles : sauf les probabilités suivantes :

P_{12} , P_{16} , P_{23} , P_{25} , P_{34} , P_{38} , P_{41} , P_{47} , P_{51} , P_{58} , P_{64} , P_{65} , P_{73} , P_{76} , P_{82} , P_{87} qui sont toutes égales à 0,5.

La situation hiérarchique des différents éléments est la même et égale à zéro.

Entre les systèmes hiérarchiques (arborescents) où les situations des différents éléments étaient très dispersées et le système égalitaire où les situations hiérarchiques sont toutes égales, on imagine qu'il peut exister des tas de cas intermédiaires.

Afin de caractériser précisément le degré de hiérarchisation d'un système quelconque, il apparaît souhaitable d'introduire un nouveau paramètre,

d'autant plus grand que le système est plus hiérarchique et nul dans le cas d'un système égalitaire. Le paramètre H mesurant le degré de hiérarchisation d'un système peut donc être défini comme étant égal à l'écart type des situations hiérarchiques.

$$H = \text{degré de hiérarchisation d'un système} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1 \text{ à } n} (S_i - S')^2 \right)}$$

où \sum désigne la sommation par rapport aux n éléments du système et où S' désigne la moyenne arithmétique des situations hiérarchiques S_i .

Il est aisé, avec la définition adoptée, de vérifier que $H=0$ dans le cas du système égalitaire précédent, alors que $H=0,785$ dans le cas du système hiérarchique de la figure 5.

VIII - CONSÉQUENCES DE LA DÉFECTION D'UN ÉLÉMENT D'UN SYSTÈME

VIII.1. Mise en situation du problème

Une autre de nos préoccupations a été d'étudier l'évolution de la structure du graphe (ou labyrinthe associé) en présence de *bruit*, c'est-à-dire de *perturbations susceptibles d'affecter la topologie* ou la distribution des « stimuli » (associés aux « champs de force » supposés orienter l'écoulement des influences à l'intérieur du système considéré). Cette évolution du système dépend de *lois de réorganisation intrinsèques* relatives à l'écoulement des influences à l'intérieur de celui-ci. Nous entendons par là les règles de modification de la topologie et de redistribution des « stimuli » orienteurs à chaque « carrefour », ceci dans l'éventualité de couloirs qui se rompent, d'embranchements qui disparaissent, de portes qui s'ouvrent ou se ferment, de petits efforts (ouvrir la porte) pouvant produire de grands effets sur la topologie et la distribution des flux d'écoulement des influences.

On peut également imaginer comme moteur d'évolution interne une « sorte de loi concurrentielle » interne entre des éléments qui tendent à éliminer d'autres éléments pour, par exemple, voir s'élever leur situation hiérarchique, en admettant que celle-ci leur soit transparente... Compte tenu de l'introduction, par exemple, de cette loi concurrentielle (souvent à l'œuvre dans les systèmes sociaux), on peut là encore avoir des indications précieuses sur *l'évolution possible du système*.

VIII.2. Loi de réorganisation supposée du système en présence de la défection d'un élément

Un problème intéressant est de voir comment évolue le fonctionnement du système lorsqu'un de ses éléments x disparaît ou devient défectueux, moyennant certaines hypothèses concernant la réorganisation spontanée de ce système.

On pourra alors examiner successivement :

a/ comment se modifie le tableau des intensités moyennes I_{ij} d'influence entre les différents couples d'éléments (i, j) du système. Si celles-ci sont fortement bouleversées, le fonctionnement du système risque de devenir très différent ; dans ce cas nous dirons que la *fragilité du système au départ de x* est grande.

b/ comment évolue la hiérarchie, ce qui par exemple donne des indications utiles sur le jeu des alliances possibles, s'il s'agit d'un système social (clivage entre ceux qui ont intérêt à voir partir x et ceux au contraire qui ont intérêt à le voir rester) ;

c/ comment évolue l'intensité moyenne d'interaction.

À titre d'exemple reprenons le schéma de propagation de la figure 6 :

Nous remarquons que de l'élément n°8, par exemple, partent en tout 10 chevrons et que les influences émanant de cet élément s'écoulent vers les autres dans la proportion de :

- 5/10 vers l'élément n°2 (car 5 chevrons de 8 vers 2) ;
- 5/10 vers l'élément n°7 (car 5 chevrons de 8 vers 7).

Nous allons supposer que les influences qui s'écoulaient, dans un sens ou dans un autre, directement vers l'élément n° x défectueux, se répartissent vers les *voisins immédiats* en fonction des influences directes déjà existantes vers ceux-ci. Ainsi dans le système ci-dessus si l'élément n°8 est défectueux les influences $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 4$, $2 \rightarrow 3$ vont évidemment disparaître pour se répartir vers les ex-voisins 1, 4, et 3 en proportion de leur ancienne ampleur respective.

Expliquons-nous à ce sujet.

Cet élément n°8 n'existant plus, les influences $8 \rightarrow 2$ et $8 \rightarrow 7$ disparaissent. Quant aux influences $5 \rightarrow 8$ et $3 \rightarrow 8$ qui s'écoulaient vers 8, elles ont été détournées respectivement au profit de 1 d'une part et 4 d'autre part, où elles se trouvent renforcées en proportion des influences directes antérieures (10 chevrons sur $5 \rightarrow 1$ au lieu de 5 et 10 chevrons sur $3 \rightarrow 4$ au lieu de 5).

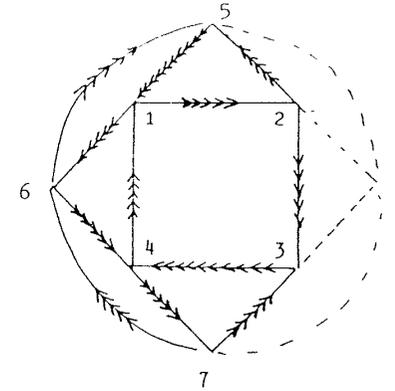


Figure 7. Nouvelles répartitions des influences dans le système égalitaire de la figure 5 après la défection de l'élément n° 8.

VIII.3. Conséquences de la défection d'un élément sur la hiérarchie d'un système

Le degré de hiérarchisation passe alors de zéro à 0,554. Après le départ de l'élément n°8 le système cesse donc d'être égalitaire et ce sont les éléments n°s 7 et 2 qui se retrouvent au sommet de la hiérarchie, c'est-à-dire qui deviennent les plus influents.

Si l'on suppose que tous les membres d'un système social sont intéressés à l'obtention d'une place plus haute dans la hiérarchie, ceux qui bénéficieront de la défection de Monsieur x seront ses *adversaires* et ils essayeront de le chasser de la société en question. Ceux qui seraient victimes de ce départ seront au contraire ses *alliés*, tout ceci en admettant qu'ils soient conscients de leur intérêt véritable.

Il est possible de construire un tableau des alliances *avant la défection* d'un élément, en envisageant la défection successive d'un des 8 éléments de départ :

Ce tableau montre que tout élément du système total possède au départ 3 « alliés » et 4 « adversaires ». Cette société *égalitaire* de 8 éléments est donc *stable* et *équilibrée* même si chacun des éléments tend, autant qu'il le peut, à accroître l'influence qu'il exerce sur les autres et à réduire les influences qu'il en reçoit ; il en sera empêché par l'équilibrage des forces en présence qui tendront à maintenir le *statu quo*. Il est donc impossible *a priori* de dire dans quelle direction le système est susceptible d'évoluer.

Tableau des alliances

n° de l'élément défectueux	« adversaires » de x	« alliés » de x
1	2, 4, 5, 6	3, 7, 8
2	1, 3, 5, 8	4, 6, 8
3	2, 4, 7, 8	1, 5, 6
4	1, 3, 6, 7	2, 5, 8
5	1, 2, 6, 8	3, 4, 7
6	1, 4, 5, 7	2, 3, 8
7	3, 4, 6, 8	1, 2, 5
8	2, 3, 5, 7	1, 4, 6

Si un événement imprévisible provoque le départ du n°8 le nouveau système *n'est plus égalitaire*. Nous allons envisager successivement la *défaillance des 7 éléments restants*, afin d'être en mesure de construire un nouveau tableau des alliances.

Tableau des alliances

n° de l'élément défectueux	« adversaires » de x	« alliés » de x
1	2, 5, 6	3, 4, 7
2	1, 3, 4, 5	6, 7
3	4, 7	1, 2, 5, 6
4	1, 7	2, 3, 5, 6
5	1, 2, 6	3, 4, 7
6	1, 5, 7, 4	2, 3
7	3, 4, 6, 5	1, 2

Ce tableau montre que les éléments n°s 2, 6 et 7 sont les plus « menacés » car ce sont eux qui possèdent maintenant le plus d'adversaires et le moins d'alliés.

Le nouveau système *amputé*, sous l'effet du hasard (« bruit »), de l'élément n°8 par exemple, non seulement n'est plus égalitaire, mais de surcroît cesse d'être stable. On est donc sorti de l'indifférenciation de départ.

Il est alors possible de conjecturer de son évolution immédiate (éviction probable de 2 ou 6 ou 7) et même plus lointaine en réitérant le processus. Cette situation s'oppose à la situation initiale, avant la disparition du n°8, où l'évolution du système était totalement imprévisible. Le hasard (l'acte de naissance) qui a éliminé le n°8 a donc non seulement décidé plus ou moins de la nouvelle structure, mais en même temps a infléchi son évolution future,

de façon irréversible. Il faut bien préciser que ce *hasard générateur n'a fait que se mettre au service d'une nécessité qui lui préexistait*, cette nécessité n'était autre que la loi intrinsèque de réorganisation spontanée du système, quand un de ses éléments devenait défaillant ; autre loi de réorganisation, autre nécessité.

IX - CONSTRUCTION D'UN ALGORITHME PRODUISANT DES NUCLÉATIONS EMBOTTÉES A DIFFÉRENTS NIVEAUX HIÉRARCHIQUES, SIMULANT AINSI L'ARCHITECTURE EN ÉTAPES DES SYSTÈMES NATURELS

Le mot hiérarchie provient des racines grecques *Hiéros* (sacré) et *Arkula* (commandement). Dans les temps anciens il caractérisait l'organisation religieuse, politique et militaire en castes superposées, avec un principe de subordination descendante entre les différents groupements étagés. Cette idée de système constitué par l'existence de structures empilées, chacune possédant une certaine autonomie consécutive à l'existence de propriétés et de *lois spécifiques à son niveau propre* est beaucoup plus générale. Par exemple elle s'applique à la matière, depuis les particules les plus élémentaires jusqu'à l'univers matériel tout entier. Il en est de même de la biologie qui en constitue un cas particulier, jusqu'aux diverses sociétés humaines. Nous avons donc affaire à un *concept universel*.

Souvent les premiers étages sont très peuplés et peu diversifiés, alors que les étages supérieurs sont plus diversifiés, tandis que la multiplicité décroît : c'est le processus d'intégration.

Si, comme nous l'avons déjà suggéré, notre esprit est lui aussi capable de décrire et représenter notre environnement en structures emboîtées à la façon des poupées russes, c'est sans doute que ce dernier s'y prête, qu'il est dans une certaine mesure lui-même structuré de cette façon (à moins que notre pensée rationnelle n'ait de prise que des choses hiérarchisées...). Ceci est flagrant dans l'organisation du vivant ou au niveau des mécanismes de perception.

On pourrait donc paraphraser Jacques Lacan et dire que la nature tout entière (et pas seulement l'inconscient) est structurée comme un langage.

Ceci pose alors le problème de l'auto-organisation, de la genèse de ces formes emboîtées les unes aux autres. Comment la nature fait-elle pour secréter, générer de telles structures étagées ? Quels sont *les principes de base indispensables qui président à de telles organisation* ? Nous savons en effet que la vie n'a pas toujours existé, que la nature s'éveille d'un chaos

primordial pour donner naissance par paliers successifs à des êtres de plus en plus complexes.

Notons que les *échelons* successivement parcourus par la chimie au XIX^e siècle et par la physique au XX^e siècle *correspondent à une échelle d'énergie*. La puissance des liens qui soudent les systèmes physiques (molécules, atomes, noyaux, nucléons) peut se mesurer en électrons-volts, c'est-à-dire en unités d'énergie de liaison. C'est la quantité d'énergie qu'il faut injecter au système pour le dissocier.

Quelques électrons-volts suffisent à séparer une molécule en ses atomes constituants. Pour désintégrer un noyau en nucléon il faut injecter des millions d'électrons-volts. Pour affecter la structure intime du nucléon, les énergies requises se mesurent en milliards d'électrons-volts.

La distinction entre matière inerte et matière vivante s'estompe graduellement. Est apparue la biochimie, science nouvelle qui étudie les comportements des atomes chez les plantes et les animaux. On découvre l'existence d'entités nouvelles : les biomolécules ou molécules géantes du monde vivant de tailles impressionnantes et dont les atomes sont disposés selon des motifs architecturaux d'une très grande complexité.

À l'échelon supérieur les cellules vivantes deviennent les éléments d'une nouvelle combinatoire. Environ deux cents espèces de différentes cellules suffisent à décrire la constitution de tous les mammifères.

En résumé, les organismes vivants sont faits de cellules et les cellules sont constituées de molécules géantes. Les chimistes déchiffrent ces biomolécules en molécules simples et celles-ci en atomes. Les physiciens étudient les atomes qui se séparent en noyaux et électrons ; les noyaux des atomes se décomposent en nucléons et ceux-ci en quarks.

Tous ces systèmes physiques sont soudés par des forces naturelles. Aux niveaux inférieurs, c'est la force nucléaire qui opère et aux niveaux supérieurs, c'est la force électromagnétique. *La puissance des liens diminue au fur et à mesure qu'on s'élève.*

Voyons comment s'édifie la pyramide de la complexité au cours du temps. Dans l'univers d'il y a quinze milliards d'années toutes les molécules étaient maintenues dans un état de dissociation permanent par l'extrême chaleur qui régnait à cette époque : c'était le chaos primordial. Par suite de l'expansion de l'univers, la température et la densité diminuent avec le temps, et le *refroidissement* est ponctué par les *événements associatifs* au cours desquels la matière va s'organiser et engendrer successivement les systèmes naturels qui jalonnent les différents échelons de la complexité.

Quand la température descend au-dessous de mille milliards de degrés, les quarks s'unissent par trois pour donner naissance aux nucléons. A partir du milliard de degrés des nucléons s'associent pour engendrer les premiers noyaux d'hélium. Un milliard d'années plus tard, les premiers atomes et molécules d'hydrogène se forment quand les électrons, par suite du refroidissement, peuvent se fixer et rester en orbite autour des protons, etc.

Nous passons sous silence, quelques centaines de millions d'années plus tard, l'apparition des premières galaxies, puis par fragmentations successives les étoiles.

On peut se poser la question de savoir à quoi nous devons la *diversité de notre monde*. Pourquoi la force nucléaire n'a-t-elle pas transformé toute la « purée » cosmique originelle dès le moment où la température aurait permis le « gel » de la matière nucléaire en noyaux atomiques ?

On peut répondre à cela si la « vague de froid » était venue plus lentement, si l'expansion de l'univers avait été plus lente, la matière cosmique se serait complètement transmutée en noyaux de fer, les plus stables que la force nucléaire puisse engendrer.

Selon Hubert Reeves (*L'heure de s'enivrer*, Le Seuil, 1986) : « Dans un univers de fer, les durées des étoiles se chiffraient en millions plutôt qu'en milliards d'années. L'élaboration des molécules géantes serait doublement compromise, d'abord par l'absence d'atomes d'hydrogène, de carbone, d'azote et d'oxygène. Et même à supposer qu'une faible quantité de ces atomes ait été épargnée cette gestation serait encore mise en difficulté par la courte durée des étoiles nourricières. L'univers serait bien différent et l'humanité sans doute n'y serait jamais apparue. »

Tout ce qui a été dit à propos de l'ontogenèse (très simplifiée) de l'univers nous a amené à tenter de *définir une dynamique aussi simple que possible, capable d'engendrer ces diverses structures emboîtées* et nouvelles où le hasard a néanmoins son rôle. En effet, ce que nous appelons volontiers nouveauté ne fait en réalité, dans une large mesure, que refléter notre connaissance insuffisante de la dynamique en question.

Nous avons tenté, par des moyens informatiques, de simuler le fonctionnement d'un *système auto-organisateur capable d'engendrer des structures emboîtées et variées*, analogues à celles que l'on rencontre dans l'univers.

Le problème est de trouver un algorithme capable de faire, dans les mécanismes associatifs mis en œuvre, la part du hasard, et celle des principes internes indispensables amenant à la formation d'agglomérats variés

(ce qu'ailleurs nous avons encore appelé nucléons), servant eux-même de matériaux de construction pour des étages plus élevés de la construction. Il s'agit donc de générer une série d'empaquetages, où chaque boîte (intégré au sens de F. Jacob, holon au sens de A. Koestler) emprunte des boîtes de l'étage inférieur, la taille, ou la configuration des boîtes à un étage donné étant, dans une certaine latitude, variée, pour engendrer un ensemble diversifié capable de conduire ainsi à une combinatoire riche.

Le plus simple est de traiter un *exemple explicatif*. Nous sommes partis d'un système, d'un ensemble E, de trente éléments indépendants numérotés de 1 à 30 (représentés par des croix sur la figure 8) et qui peuvent par analogie être assimilés, toutes proportions gardées, au chaos primordial de l'univers. Au *départ* donc (niveau 1 pour simplifier), les particules sont supposées être *isolées* les unes des autres.

Dans un premier temps deux (ou plusieurs) particules de l'ensemble initial E peuvent s'associer au hasard pour constituer un agglomérat, un nucléon de niveau 2. Ceux-ci sont représentés par un nuage de Venn sur la figure 8.

Nous avons imposé arbitrairement une *taille maximum de 4 éléments aux nucléons* de niveau 2. Cette taille limite de 4 éléments a d'ailleurs été, pour plus de simplicité, reconduite aux niveaux supérieurs, mais ceci n'a rien d'impératif.

Nous constatons sur la figure 8 (qui représente l'ensemble initial dans un état avancé de nucléation) que certains nucléons (de niveau 2) tels que 2-8-13-16 et 10-11-18-19 sont *saturés* puisque composés de quatre éléments. Par convention le *représentant* de niveau *n* de chaque nucléon est l'*élément de numéro le plus bas* qui entre dans la composition de ce nucléon. Ainsi, le premier nucléon cité admet pour représentant, au niveau 2, l'élément n°2 et, le deuxième nucléon cité a pour représentant l'élément n°10 au même niveau.

L'algorithme est conçu de telle façon que *lorsqu'un nucléon est saturé à un niveau n donné il ne peut alors s'associer qu'à un niveau supérieur n+1 avec un nucléon de niveau n* (saturé ou non à ce niveau). Autrement dit les nucléons de départ restent *figés, gelés dans leur composition du niveau d'origine*. Nous voulons dire par là, qu'ils ne peuvent plus grossir, c'est-à-dire s'associer avec d'autres éléments (ou nucléons).

Ainsi le « hasard » a fait que le nucléon saturé 2-8-13-16 de représentant 2 s'est associé au niveau 3 avec le nucléon 6-20 non saturé, de niveau identique et de représentant 6 à ce niveau.

Ce principe de stabilisation à un niveau *n* lorsque l'association a pu se faire au niveau supérieur *n+1* est l'équivalent, la transposition du principe

physique qui fait que les forces de liaison, d'association sont plus fortes aux niveaux plus profonds (inférieurs) de structuration (force nucléaire plus forte par exemple que la force magnétique), faisant que la dissociation, si dissociation il y a, se fait d'abord par les couches périphériques. Aux *niveaux les plus bas* c'est le gros œuvre, le « béton armé » où *l'infrastructure est quasi inaltérable*.

Nous avons vu que dans l'univers la variété des structures était produite par une diminution trop rapide de la température cosmique, évitant ainsi la monotonie des systèmes stables (noyaux de fer ou gaz rares). Dans l'exemple que nous traitons, les équivalents de ces systèmes stables et monotones seraient des agrégats contenant exclusivement 4 éléments (ou 4 nucléons). Dans notre modèle cette monotonie n'existe pas. Par exemple le nucléon 6-20 de taille 2 est stabilisé au niveau 2 (avant saturation), parce que participant à une nucléation de niveau supérieur. Ainsi le niveau supérieur (niveau 3) sera construit avec des agrégats de tailles diverses du niveau inférieur, engendrant ainsi une *diversité* qui est le correspondant (plus que modeste) de la diversité cosmique...

Afin de montrer le *rôle du hasard* dans la genèse de ces structures emboîtées les unes aux autres, nous avons relancé le programme. La « semence » de départ générant les nombres pseudo-aléatoires étant différente, on aboutit évidemment à des nucléons tout autres. Ceci montre la part du hasard et de la nécessité.

X - LES AVANTAGES DES NUCLÉATIONS EMBOÎTÉES D'UN SYSTÈME A DIFFÉRENTS NIVEAUX : DIMINUTION DE LA COMPLEXITÉ

Nous savons que la difficulté à administrer un groupe contenant un grand nombre de personnes croît plus vite que le nombre *n* d'individus qui le composent. La célèbre *loi de Parkinson* suggère que cette difficulté croît sensiblement comme n^2 , c'est-à-dire que lorsque le nombre de personnes double, elle est multipliée par quatre. En fait, la difficulté à administrer *n* personnes, toutes en interaction, dans un système non hiérarchisé (c'est-à-dire possédant un seul niveau) croît en toute rigueur comme le nombre de couples (*i, j*) qu'on peut former (avec *i* différent de *j*), c'est-à-dire comme : $n.(n-1)$.

Cette croissance rapide en fonction de *n* limite sans doute la taille des groupes sociaux, provoque des divisions en cellules plus petites et la constitution de structures hiérarchisées à différents niveaux. Les biologistes

Autonucléation sur 4 niveaux d'un ensemble de trente éléments

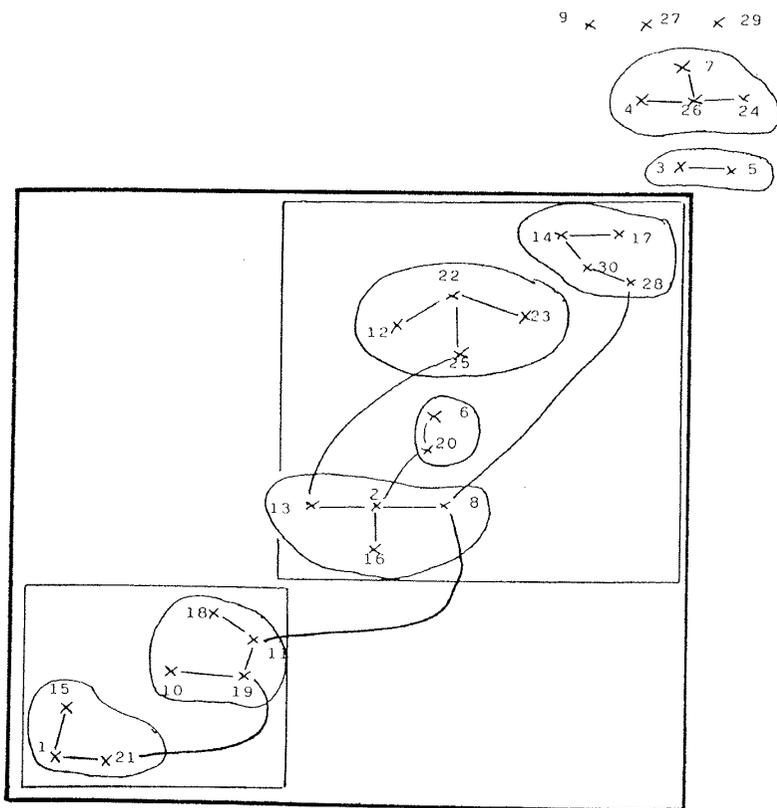


Figure 8. Schématisation des résultats du programme « NUCLEATI ». Ce programme permet une autostructuration d'un système de trente éléments à différents niveaux, emboîtés les uns aux autres.

- Les éléments de départ (isolés au départ) sont représentés par des croix (niveau 1).
- Les nucléons de niveau 2 sont représentés par des nuages de Venn.
- Les nucléons de niveau 3 sont représentés par des rectangles à bord mince.
- Le seul nucléon de niveau 4 est représenté par un rectangle à bords épais.
- Les relations directes entre éléments sont représentées par des lignes continues.

ont d'ailleurs remarqué que la forte densité d'individus de la même espèce dans un milieu donné crée une grande intensité des relations et détermine

une excitation des activités ainsi qu'une taille maximum des colonies, ceci indépendamment des ressources alimentaires possibles.

La *difficulté d'interaction*, que l'on définira comme proportionnelle au nombre d'interactions directes ou indirectes possibles, diminuera évidemment si on scinde la population en groupes, les groupes interagissant alors entre eux comme entités globales, les interactions directes entre individus étant, elles, étroitement circonscrites à l'intérieur du groupe.

Revenons sur le système en cours de nucléation de la figure 8 en nous tenant à la zone délimitée par le rectangle à bords épais, totalement liée.

La *difficulté d'interaction au niveau 2* est proportionnelle à :

$$4.(4.3) + 1.(3.2) + 1.(2) = 56.$$

puisque ce niveau contient 6 nucléons (circonscrits par des nuages de Venn), dont 4 de taille 4, 1 de taille 3 et 1 de taille 2

La *difficulté au niveau 3* est proportionnelle à : $1.2 + 3.2 = 7$, car ce niveau contient deux nucléons (circonscrit par des rectangles à bords minces) l'un de taille 2 et l'autre de taille 3.

La *difficulté au niveau 4* est proportionnelle à : 2, puisqu'à l'intérieur du rectangle à bords épais de la figure 11 n'existent que les deux rectangles à bords minces reliés deux à deux globalement.

Après hiérarchisation associée à cette autostructuration (inachevée soulignons-le) la difficulté totale est donc proportionnelle à : $56 + 7 + 2 = 65$, alors que sans cette hiérarchisation elle est proportionnelle au nombre de liaisons directes entre les 22 éléments totalement liés entre eux, c'est-à-dire à : $22.21 = 462$.

On entrevoit donc l'avantage de scinder la population en groupes à différents niveaux. On imagine même qu'il doit être possible, relativement à certaines hypothèses, d'introduire une *loi de fractionnement optimum* qui réduise le plus possible la difficulté totale D d'interaction, l'état d'équilibre étant précisément obtenu en minimisant D .

Julien Book et G. Toulouse (1978 et 1983) se sont précisément intéressés à cette loi. Ils sont partis d'un groupe de n personnes qu'ils ont scindé en n_1 sous-groupes contenant chacun n_0 personnes.

Ces chercheurs se sont inspirés des théories physiques et plus particulièrement de la thermodynamique qui repose sur des principes variationnels. L'état d'équilibre d'un système d'atomes ou de molécules est obtenu en cherchant les minima ou les maxima de certaines fonctions thermodynamiques comme l'énergie libre, l'entropie, etc.

Ils ont supposé que la difficulté pour les n_1 sous-groupes à communiquer entre eux était proportionnelle à $(n_1)^2$. La difficulté totale D est alors la somme des difficultés à chaque niveau, c'est-à-dire :

$$D = (n_0)^2 \cdot n_1 + (n_1)^2.$$

Cette difficulté totale passe par un minimum égal à $1,9 \cdot n^{4/3}$ lorsque $n_0 = 1,26 \cdot n^{1/3}$.

Dans ce raisonnement, deux niveaux d'intégration seulement ont été envisagés :

- le premier niveau constitué par chaque cellule de base contenant n_0 personnes,
- le niveau supérieur où les n_1 sous-groupes intercommuniquent.

Les mêmes auteurs généralisent leur raisonnement et s'interrogent sur le nombre optimal de niveaux d'intégration (nombre de niveaux hiérarchiques) souhaitables pour une taille donnée de société, en prenant même en compte le fait éventuel d'une difficulté plus grande d'intercommunication lorsque le niveau hiérarchique est plus élevé (les rivalités augmentent souvent avec l'échelon hiérarchique).

Il est certain en tous cas que la décomposition échelonnée et hiérarchique des fonctions dans la nature ou dans la société diminue la difficulté d'interaction et par là *augmente l'efficacité*. En vertu des lois de *concurrence*, qui règnent autant sur le plan biologique que social, sont sélectionnées les structures les plus efficaces. Tels sont les *rappports que l'on peut établir entre le Darwinisme et la hiérarchisation du réel*.

Cela explique peut-être que l'on ne trouve pas de grandes différences entre les lois de l'écologie humaine et celles des cellules et des molécules. La dépendance à l'égard de l'environnement, le tri par autoségrégation, la combinaison par groupes, l'association en vue d'une réciprocité symbiotique, en bref l'autostructuration des groupes, existent aussi bien chez les molécules et chez les hommes.

Le fonctionnement intégrant des systèmes, qu'il s'agisse du corps dans sa totalité ou du cerveau qu'il abrite, ne se fait donc pas directement sur les molécules, mais seulement par l'intermédiaire de sous-systèmes subordonnés, disposés hiérarchiquement selon leur ordre de grandeur (même chose pour la description de l'ordre hiérarchique des cellules). Chaque sous-système domine ses propres éléments subordonnés, dans son domaine propre, en restreignant leur degré de liberté, conformément au rôle qu'il joue dans le système total ;

exactement comme ses propres degrés de liberté ont été limités par la structure du système supérieur dont il est partie intégrante.

De même que le cerveau humain diminue la difficulté de mémorisation en se contentant de *transparences partielles et étagées*, tout se passe comme si les éléments constitutifs de la nature n'étaient pas en interconnexion totale avec les autres éléments constitutifs de l'univers. Tout se passe comme s'il n'y avait que des interdépendances partielles seulement, la nature utilisant efficacement un principe de répartition échelonnée et hiérarchique des tâches vers les sous-systèmes, pour permettre de conserver l'ordre sans avoir à s'occuper de trillions de molécules.

C'est bien le principe de la délégation rencontré dans les sociétés humaines : il y a un responsable à chaque niveau pour contrôler, coordonner le sous-système concerné. Ce responsable est en liaison avec le niveau supérieur, etc.

XI - CONCLUSION

Nous avons dans ce chapitre montré le rapport qu'il y avait entre le concept de labyrinthe et celui de système, les acquis de l'un pouvant enrichir l'autre, et *vice versa*.

En fait ce travail vient en contrepoint d'un autre travail qui traite lui de la contribution de labyrinthe à la compréhension des processus d'autostructuration de l'esprit et de la créativité scientifique.

Il semble bien qu'il y ait un lien étroit entre la genèse des transparences partielles emboîtées et étagées que le cerveau acquiert sur son environnement et la genèse des formes (fonctionnelles) emboîtées et étagées, elles aussi, que la science observe partout dans la nature.

On peut toutefois se poser le problème de l'adéquation de nos modèles conceptuels à la réalité. Celle-ci n'est-elle pas très fortement conditionnée par la structure de nos organes ou appareils perceptifs, enfermés dans des « catégories *a priori* de l'observation », qui tendent à découper le réel en systèmes dont les composants sont provisoirement supposés insécables au niveau ou selon la méthode d'observation choisie ? Si l'on approfondit l'analyse, les composants de ces systèmes apparaissent eux-mêmes comme des sous-systèmes...

En fait on a tout lieu de se demander si, dans une perspective complète, les fragments que le monde extérieur nous présente ne sont pas seulement des éléments artificiellement circonscrits, des éléments rendus abstraits par

suite d'opérations mentales, et extraits d'un ensemble global *cohérent*, matériellement *indivisible* et présentant un caractère d'intégralité intrinsèque. Les parties que nous disséquons mentalement parce qu'elles nous intéressent particulièrement, ou parce qu'elles se sont imposées à notre attention, ne seraient jamais véritablement isolées, ni isolables du reste.

Dans la réalité donc, le système et ses constituants coexisteraient de manière cohérente et rien n'exige le *démembrement appauvrissant* auquel nous procédons, le « niveau » dont nous avons parlé, ne représente en fait que l'ensemble des régularités de structures sur lesquelles porte l'attention de l'observateur lorsqu'il explore les différents ordres de grandeurs. Cette exploration ressemble à ce que l'on fait en changeant le grossissement d'un microscope, les détails les plus fins n'apparaissent qu'au prix d'une réduction progressive du champ de vision. À chaque niveau on peut observer des constantes remarquables.

Venant à l'appui de ce qui vient d'être dit, signalons que la taille des systèmes, des nucléons sur lesquels porte notre attention au niveau choisi, dépend des attitudes propres à notre espèce. Cette taille est liée en effet d'une part à nos mécanismes de perception (éventuellement amplifiés par des instruments) et d'autre part aux limitations de notre champ mémoriel qui fait que notre dominance cognitive ne peut s'exercer que sur un ensemble d'éléments en interaction limité. Il y a donc un seuil, une limitation à la taille des fragments que nous observons et analysons. Si la nature présentait réellement des nucléations avec des tailles dépassant ce seuil on pourrait s'interroger sérieusement sur l'adéquation et la valeur opérationnelle de nos modèles conceptuels.

D'autre part la nature est riche de *système polyvalents* (systèmes biologiques, systèmes sociaux) faisant appel à différents types de dynamique. Relativement à un même organisme il y a donc pluralité de systèmes, chacun possédant deux types d'interaction de nature et de configuration différentes. La topologie des labyrinthes associés y est donc autre. Il faut distinguer, dans cette pluralité, essentiellement les *systèmes de contrôle* qui captent, véhiculent l'information dans un but de commande et de coordination, et les autres, lesquels sont asservis en étant placés sous cette commande et sous ce contrôle. Dans la terminologie des labyrinthes, on peut dire que les labyrinthes associés à ces derniers systèmes sont variables et dépendants des premiers. On assiste alors à des mécanismes de feed-back complexes qui nécessitent des théories plus élaborées que celles évoquées dans ce travail.

Références

- H. ATLAN, *Entre le cristal et la fumée*, Seuil, Paris, 1979.
- C. BERGE, *Théorie des graphes et ses applications*, Dunod, Paris, 1979.
- L. BERTALANFFY, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, Paris, 1973.
- J. BOOK, G. TOULOUSE, *Colloque de Cerisy. L'auto-organisation*, Seuil, Paris, 1983 et *Revue française de sociologie*, XIX, 1978, pp.191-406.
- P. DELATTRE, *Système, structure, fonction, évolution, essai d'analyse épistémologique*, Maloine, Paris, 1971, 1984.
- A. DUCROCQ, *Logique générale des systèmes et des effets, introduction à l'intellectuelle*, Paris, Dunod, 1960.
- J. P. DUPUY, P. DUMOUCHEL (dir.), *L'auto-organisation, de la physique au politique*, Seuil, Paris, 1983.
- J. EUGENE, *Aspects de la théorie générale des systèmes. Une recherche des universaux*, Maloine, 1981.
- Y. FRIEDMAN, *Utopies réalisables*, Collection 10/18, Paris, 1975.
- J. HADAMARD, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, 1959.
- F. JACOB, *La logique du vivant*, Gallimard, Paris, 1970.
- J. KUNTZMANN, *Théorie des réseaux*, Dunod, 1972.
- C. LEFEVRE, Flux touristiques et labyrinthes urbains. Approche à l'ordinateur d'une esthétique de l'espace, *Thèse de troisième cycle* soutenue le 17.12.83 à l'I.P.S.C. de Strasbourg.
- C. LEFEVRE, Flux touristiques et labyrinthes urbains, *Bulletin de l'Idate*, juillet 1985, n°20.
- C. LEFEVRE, *Labyrinthe et communication, Architecture et comportement*, vol.4, n°3, p.277-293, Ecole polytechnique de Lausanne, 1989.
- C. LEFEVRE, Le labyrinthe, système de mobilité contrainte. Application à l'urbanisme, la didactique et l'esthétique, *Thèse d'Etat* en lettres et sciences humaines, déposée en septembre 1988 et soutenue en décembre 1989 à l'Université Pasteur à Strasbourg.
- C. LEFEVRE, *Le labyrinthe, système de mobilité contrainte*, Bulletin n°14 édité par l'Association Internationale de Micropsychologie Strasbourg, France (octobre 1990).
- C. LEFEVRE, *Les labyrinthes de la pensée*, Communication faite le 4 avril 1991 à Orléans au colloque « Universalité et Université » et publié dans les actes de ce colloque.
- C. LEFEVRE, *Le labyrinthe, des labyrinthes spatiaux aux labyrinthes mentaux*. Communication faite le 16.12.1991 au Séminaire de Philosophie et Mathématiques à l'Ecole Normale Supérieure de Paris, communication publiée par l'I.R.E.M. Paris-Nord, n°75.
- C. LEFEVRE, Le labyrinthe comme champ autodidactique, *Humanisme et Entreprise*, n°191, février 1992.
- A. MOLES, C. LEFEVRE, *Le paysage urbain source de connaissance. peut-on transformer la culture mosaïque en programmant le champ autodidactique dans la cité ?*, Barcelone, 1990.

- A. MOLES, C. LEFEVRE, *Urban Landscape as Source of Knowledge*, Bulletin de l'Association Internationale de Micropsychologie, Strasbourg, France, 1991.
- J. LESOURNE, *La notion de système dans les sciences contemporaines*, éd. de la Librairie de l'Université, Aix-en-Provence.
- B. MANDELBROT, *Les objets fractals : forme, hasard et dimension*, Flammarion, Paris, 1984 (2^e édition).
- A. MOLES, *La création scientifique*, Kister, Genève, 1957.
- A. MOLES, *Communication et langage*, Gauthier-Villars, Paris, 1963.
- A. MOLES, *Labyrinthes du vécu*, Librairie des Méridiens, Paris, 1982.
- A. MOLES, *Théorie structurale de la communication et société*, Paris, Masson, 1986.
- W. L. PRICE, *Introduction aux graphes et aux réseaux*, Masson, Paris, 1974.
- H. A. SIMON, *The Architecture of Complexity*, Proceedings of the American Society, 1962.
- H. A. SIMON, *Models of discovery*, D. Reisel, Boston (Mass), 1977.
- R. THOM, *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, Christian Bourgois, Paris.

LA MORPHODYNAMIQUE

ERGODICITÉ DANS LES SYSTÈMES COMPLEXES

Roland FIVAZ¹

Résumé

La morphodynamique est une théorie générale des systèmes complexes stationnaires, tels que systèmes vivants, mentaux ou sociaux ; elle est basée sur la thermodynamique des systèmes physiques et construite selon la même démarche. Moyennant l'hypothèse ergodique, la thermodynamique conduit de la dynamique des particules à l'émergence de paramètres d'ordre dans les équations d'état. De même, moyennant l'application répétée de l'hypothèse ergodique, la morphodynamique conduit des paramètres d'ordre à l'émergence de nouvelles variables d'ordre ; par récurrence, une hiérarchie d'équations d'état est construite qui décrit des niveaux d'organisation successifs. Les équations imposent une interprétation cognitiviste qui conduit aux principes d'évolution : ils déterminent la complexification spontanée et irréversible des systèmes vivant dans leur milieu naturel.

Abstract

Morphodynamics is a general theory of stationary complex systems, such as living systems, or mental and social systems ; it is based on the thermodynamics of physical systems and built on the same lines. By means of the ergodic hypothesis, thermodynamics connects the particle dynamics to the emergence of order parameters in the equation of state. In the same way, morphodynamics connects order parameters to the emergence of higher level variables ; through recurrent applications of the ergodic hypothesis, a hierarchy of equations of state is established which describes a series of successive levels of organization. The equations support a cognitivist interpretation that leads to principles of evolution : they determine the spontaneous and irreversible complexification of systems living in their natural environment.

1. Institut de physique appliquée, École Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse.