

Introduction à la compréhension des systèmes (systémique)

Jean-Pierre Camuzard
Ingénieur du GREF

ENGREF/ENSMP
Paris/Fontainebleau

Mastère IGE

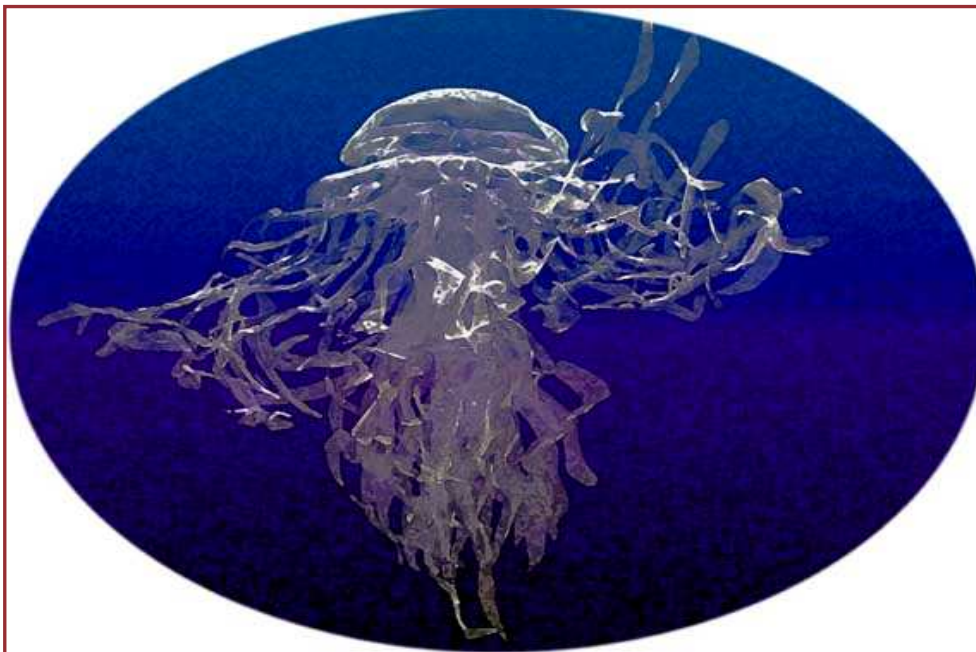
2006

« Les systèmes ne sont pas dans la nature mais dans l'esprit des hommes »

Claude Bernard, 1865

Première partie

L'âme de Pélagie, la méduse



"Mais, quand d'un passé ancien rien ne subsiste, après la mort des êtres, après la destruction des choses, seules, plus frêles mais plus vivaces, plus immatérielles, plus persistantes, plus fidèles, l'odeur et la saveur restent encore longtemps, comme des âmes, à se rappeler, à attendre, à espérer, sur la ruine de tout le reste, à porter sans fléchir, sur leur gouttelette presque impalpable, l'édifice immense du souvenir."

Marcel Proust

Méduse n.f. (de Méduse n.pr.)

Animal marin représentant la forme nageuse et sexuée de nombreux cnidaires, fait d'une ombrelle contractile, transparente et d'aspect gélatineux, dont le bord porte des filaments urticants et la face inférieure la bouche et les tentacules.

Petit Larousse, 2005

Un poème de Jacqueline Goy

*Mon regard s'est figé... là, sous l'onde s'enfuit
Une bulle marine dont la couleur luit.
Dans un éclair d'argent aux reflets irisés
Comme une pierre de lune, Pelagia a plongé.
La vague l'a emportée mais le rêve demeure.
Ce feu sur l'océan ressemblait à un leurre,
Vision fugitive que l'abîme engloutit
Au fond des ténèbres, là où règne la nuit.
Alors soudain sur l'eau, un mirage insensé
Imite une forme aux contours ondulés.
Cet étrange halo n'est d'abord que lueur
Tel un reflet d'argent surgit des profondeurs.
Miroitant sur les flots, cette lumière diffuse
Dessine peu à peu le visage de Méduse.*

Une courte note biologique sur Pélagie, (Pelagia Nocticula)

Avec *Aurelia aurita*, l'espèce que l'on trouve le plus fréquemment dans les eaux du sud de la France est *Pelagia Nocticula*. Elle mesure de vingt à trente centimètres de diamètre. De couleur violet-bleu pâle, elle est transparente car son corps contient moins de 90% de substances organiques. Elle est dépourvue de squelette, de cerveau, de poumons et de sang, mais les scientifiques ont détecté un réseau de cellules nerveuses, ainsi qu'un système de respiration basé sur les échanges gazeux à travers la peau. Elle a la propriété particulière d'être bioluminescente. Très présente en Méditerranée elle provoque, du fait de la présence de cellules urticantes, la crainte (justifiée) des nageurs. On la rencontre également sur les côtes Aquitaine en colonies dérivantes d'individus qui s'échouent sur les plages victimes des surprises de la marée.

Sommaire de la première partie

Préambule

1. Système et complexité : historique et définitions

A. Système, milieu et systémique

B. Les initiateurs, inventeurs et utilisateurs du concept

C. La marque de Descartes : la dichotomie objet-sujet, un défi à la complexité

3. Structure, organisation, fonction : le chemin vers la complexité

A. Structure et organisation

B. Organisation et fonction : deux notions indissociables et interférentes

C. Interaction/globalité/complexité : trois concepts fondamentaux de la théorie des systèmes autour de celui d'organisation

4. La circulation des flux dans le système, conditions de stabilité dynamique

A. Les trois grands types de flux : matière, énergie, information

B. Flux et stabilité des systèmes, rôle de l'information

C. Hiérarchisation fonctionnelle des systèmes ou emboîtements des différents niveaux de réalité (ou d'approche)

5. Dynamique des systèmes

A. Typologie des relations dans un système

B. Systèmes et entropie

C. Expression de l'incertitude du milieu et risques

Conclusion de la première partie

En préambule, un souvenir de méduse...

Je n'étais pas revenu sur la plage du Moulleau, littoral de la partie sud du Bassin d'Arcachon, depuis bien longtemps, il y a à peu près un demi siècle. C'était l'été dernier. Une méduse (Pelagia), pitoyable et informe, abandonnée par la marée montante, séchait au soleil, au pied des dunes. Commencant à se décomposer, elle dégageait un parfum annonçant les effluves pestilentielles qui accompagnent habituellement le passage de vie à trépas. Ces odeurs, identiques à celles que l'accumulation du varech mélangé à la vase exhale dans l'atmosphère nébuleuse et ouatée des étendues marécageuses immergées de chaleur, réveillèrent quelques images enfouies au plus profond de moi-même, resurgies subrepticement à la manière de l'ami qui revient et que l'on n'attendait plus.

Contre toute attente et en dépit des modifications apportées au littoral, j'eus tout à coup l'étrange impression que rien n'avait changé. La même eau verte, les mêmes bancs de sable, les mêmes mouettes en quête de nourriture, les mêmes méduses échouées, les mêmes odeurs apportées par les algues mélangées à celles des pins maritimes craquant sous la chaleur de l'été. Les images du lointain semblaient sorties d'un album photographique, le phare du Cap Ferret était toujours à la même place, émergeant de la pinède, régnant en maître sur un univers immobilier toujours aussi convoité.

Tout semblait demeurer à l'identique. Pourtant rien, ou presque, n'était fait de la matière d'origine. A l'évidence tous ces objets et tous ces êtres qui composent le paysage du Bassin n'ont rien de commun avec ceux du passé. Les cellules des arbres se sont renouvelées plusieurs fois. Des pins ont été abattus et d'autres ont poussé à leur place. Les êtres vivants se sont reproduits, les grains de sable ont succédé aux grains de sable. Insidieusement les paysages se sont transformés. Les plages se sont érodées, entraînant dans leur recul, les blockhaus du mur de l'Atlantique, désormais réduits à quelques fragments de béton immergés. Il ne reste quasiment plus aucune des molécules organiques des écosystèmes d'autrefois, pas même celles composant le corps de mon enfance. Cependant on persiste à me reconnaître comme chacun identifie et nomme les contours, ambiances et milieux de ce que les bordelais appellent « le Bassin », haut lieu de souvenirs.

Caractère immanent de la nature et des paysages, il reste les formes, une globalité, des sensations, une permanence des choses et des êtres, un équilibre des forces qui contraignent le monde. Il reste la marque des flux qui traversent tous les systèmes, qui leur donnent une forme, un sens. Il reste des structures, une organisation. Le Bassin demeure globalement à l'image de celui que j'ai jadis connu : l'oiseau est toujours l'oiseau, la mouette a toujours le même cri, le pin reste semblable à lui-même, la méduse est échouée au même endroit et moi toujours moi, avec une composition totalement différente, mais une même conscience et un même patronyme.

Le tout se maintient dans le changement, dans une série de transformations où la matière se renouvelle. En revanche l'information, précisément celle à qui l'on doit de pouvoir identifier des choses et des êtres, demeure, au risque de la mort si, par hasard, elle vient à s'éteindre.

Au coeur de cet ordonnancement, de la complexité des systèmes qui structurent le monde et des identités qui s'y dessinent, il flotte un imperceptible et immatériel parfum, seul capable de transformer la mémoire en souvenir, j'ai nommé l'âme des êtres, celle des hommes en particulier et peut-être aussi, celle de la méduse, au sein de l'essence de son identité?¹.

¹Le titre de cette première partie est librement inspiré de Jorge Wagensberg : « Ideas sobre la complejidad del mundo », Tusquets Editores Barcelona, 1985, 1989, 1994 ; traduction française « L'âme de la méduse » Paris, Editions du Seuil, 1997.

1. Système et complexité : historique et définitions

A. Système, milieu et systémique

En première approche, le mot système paraît ambigu : polysémique, vague, imprécis. Un peu comme le mot « milieu » auquel il est fréquemment associé, lequel désigne paradoxalement à la fois le centre des choses et leur contour, voire leur contexte. Quel rapport existe-t-il entre système métrique utilisé dans les sciences de la mesure, système réactionnel en chimie, système gravitationnel en physique, système locomoteur ou circulatoire en biologie, système monétaire en économie, écosystème, système urbain, système social, système solaire etc.?

Répondre à cette question renvoie à la systémique, c'est-à-dire à la compréhension du fonctionnement des systèmes et de leur rapport avec l'environnement, dans le cas où il s'agit de systèmes ouverts c'est-à-dire qui échangent avec l'extérieur.

On peut néanmoins répondre sans risques (?) qu'il existe un point commun à tous les systèmes : *ce sont tous des ensembles d'éléments en interrelation, régulés et organisés*. De la même façon que le milieu appartient au domaine du global, le système appartient à celui du relationnel, de l'interactif. Tout ce qui est milieu est subordonné à l'existence du fonctionnement des systèmes qui leur confèrent une identité.

Un système n'a d'existence que par le regard qu'on lui porte, en fonction de notre interprétation du monde. Le système est avant tout un outil conceptuel qui n'existe que par l'usage que l'on en fait. Il permet de comprendre la complexité des phénomènes.

B. Les initiateurs, inventeurs et utilisateurs du concept (l'outil conceptuel)

a/ Les initiateurs

Plus d'un siècle après le rationalisme de Descartes (Discours de la méthode, 1637), sont publiées, en deux tomes, à Londres, en 1771, les œuvres d'un certain Mirabaud², intitulées « *Système de la Nature ou des Loix du monde physique et du monde moral* ». A la fin du XIX^e siècle, Emile Boutroux, professeur à la Sorbonne, publie, en 1874, « *De la contingence des lois de la nature* »³, où l'on trouve la réflexion suivante "Chaque monde contient quelque chose de plus que les mondes qui lui sont inférieurs", en fait prémisse de la théorie des systèmes et mise en évidence de la complexité.

B/ Les inventeurs

Le principal inventeur du concept, au milieu du XX^e siècle serait Ludwig von Bertalanffy formé dans la tradition néo-positiviste du cercle de Vienne, puis du groupe berlinois de la « société de philosophie empirique » des années 1920. A l'époque régnait l'approche mécaniste qui consistait à réduire les organismes vivants en éléments distincts et fonctions partielles en négligeant ce qui est de l'ordre de l'organisation, de la totalité et des régulations (homéostasie). Bertalanffy proposa une conception organique de la biologie

²..[Jean-Baptiste de Mirabaud était secrétaire perpétuel de l'Académie française, mort à Paris, en Juin 1760, âgé de 85 ans, une note bibliographique rédigée par l'éditeur nous apprend quelle a été la vie de cet écrivain, prêtre, précepteur et philosophe...et auteur d'écrits audacieux pour l'époque. En fait Mirabaud est un pseudonyme et le véritable auteur s'avère être le Baron d'Holbach (Paul-Henri Thiry d'Holbach ou Paul-Heuri Dietrich d'Holbach) et... Diderot dans une deuxième édition a été publiée en 1774 à Londres].

³Publié à Paris chez Baillière pour la première édition puis en 1895 pour la deuxième édition Paris, Librairie Félix Alcan, elle sera suivie de six autres éditions, jusqu'en 1915

montrant l'importance du tout (c'est-à-dire du système) par la prise en compte, chez les êtres vivants, de l'implication réciproque des différents niveaux d'organisation.

Généralisant ces découvertes il fut conduit à mettre en œuvre une théorie intitulée « General System Theory » *théorie du système général* (mal) traduit par « *théorie générale des systèmes* », Bordas, 1973 ; Dunod, 1991,1993. Cette théorie fut présentée au séminaire de philosophie de Charles Morris à l'Université de Chicago en 1937.

Mais les théories et découvertes de Bertalanffy ne trouvèrent un réel écho qu'après la seconde guerre mondiale en parallèle avec trois grands mouvements scientifiques ou lignes de pensée : la théorie des jeux de Neumann (1947), la cybernétique de Wiener⁴ (1948) et la théorie de l'information de Shannon⁵.(Shannon et Weaver (1949).

Les auteurs donnent des systèmes la définition suivante : « ensemble d'unités en interrelations mutuelles » : admettons qu'ainsi libellée, cette définition ne contient pas une charge heuristique exceptionnelle. Pourtant elle constitue la base d'une réflexion qui est certainement loin d'être achevée et qui connaît des prolongements multidisciplinaires essentiels à la recherche.

Dans une perspective historique, parmi les inventeurs, il conviendrait de citer aussi :
- Mc Culloch, neuropsychiatre : inventeur de la bionique ;
- J.W. Forrester, ingénieur électronicien : *dynamique générale des systèmes*, 1960 ;
et les auteurs du rapport établi pour le club de Rome : *halte à la croissance*, 1972.

c/ Les développeurs

L'ouvrage qui a le plus fait connaître la systémique au grand public est sans nul doute celui de Joël de Rosnay, *Le macroscopie*, Le Seuil, 1975. Le macroscopie étant, face au microscope (l'outil d'observation de l'infiniment petit) et au télescope (l'outil d'observation de l'infiniment grand), l'instrument (imaginaire) d'observation de l'infiniment complexe. Rosnay introduit dans la définition des systèmes une notion fondamentale celle de but : « ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but ». Cet ouvrage a constitué, dans les années 1970, la référence de tous les systémiciens en puissance. Joël de Rosnay fut suivi par :

J. Lesourne, *Les systèmes du destin*, Dalloz, 1976

et *Les mille sentiers de l'avenir*, Seghers, 1981. « Système défini comme un ensemble d'éléments liés par un ensemble de relations » ;

B. Walliser, *Systèmes et modèles, introduction à l'analyse de systèmes*, Seuil,1977.

d/ Dans le sillage de la théorie des systèmes et de la pensée complexe

Un certain nombre d'ouvrages fondamentaux quant au développement de la pensée complexe, qui procèdent de démarches empruntées à la théorie des systèmes ou qui embrassent des champs de connaissance voisins. Parmi eux, nous citerons :

P. Delattre , *Système, structure, fonction, évolution*, Paris, Maloine-Doin, 1971.

Jean-Pierre Dupuy, *L'enfer des choses*, Paris, Seuil,1979,

et *Ordres et désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, Paris, Seuil, 1982 ;

René Thom, *Paraboles et catastrophes*, Flammarion, 1983

et *Esquisse d'une sémiophysique, physique aristotélicienne et Théorie des catastrophes*, Inter-éditions, (87 avenue du Maine à Paris), 1988 ;

Gilbert Chauvet, *La vie dans la matière*, Flammarion, 1995 ;

Jorge Wagensberg, *Ideas sobre la complejidad del mundo*, 1985. (Seuil, 1997) ;

Edgar Morin, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, ESF éditeur, 1990.

⁴ Norbert Wiener, professeur au MIT : *Cybernetics*, 1948

⁵ Shannon, ingénieur des télécommunications : *la théorie mathématique de la communication* ;

Il faudrait également compléter cette liste de références récentes puisées dans des champs de recherches hérités, imprégnés ou influencés par la théorie des systèmes, chez des auteurs passionnants, pour la plupart philosophes tels que Michel Serres, Bruno Latour, François Dagognet, Anne Cauquelin, Alain Corbin, F.J.Varela, mais aussi **Augustin Berque** et **Michel Onfray** dont je cite, en encadré ci-après, deux passages qui semblent parmi les plus significatifs à cet égard (mais aussi les plus beaux).

Augustin Berque, 1996. « C'est qu'il y a quelque chose de plus, dans la relation de l'humanité à l'étendue terrestre, que dans la relation des autres êtres vivants à leur environnement : l'humanité aussi, en tant qu'espèce vivante, a un environnement ; mais seule l'humanité possède une écoumène : la Terre en tant que nous l'habitons. Plus encore en tant que lieu de notre être." *Etre humains sur la terre, principe d'éthique de l'écoumène*, coll. « le débat », Gallimard, Paris, 212 p.

Michel Onfray, 1996. "Avant toute vie rampante, chaloupante ou marchante, la pierre exprime la présence, ce que les philosophes appellent la pure présence au monde. Aveugle et dépourvue de conscience, sommaire dans sa vitalité et son énergie, la pierre contribue à une grammaire, une syntaxe, qui permettent un style, ce qu'en d'autres termes on appelle le terroir. Les concrétions minérales sont un vocabulaire, les formes pierreuses une étymologie, le sol, une langue". p. 11. *Les formes du temps. Théorie du Sauternes*, librairie Mollat éd., Bordeaux, Fanlac imp. Périgueux, 67 p. diffusion Seuil.

Pour être complet, signalons quelques ouvrages à finalité pédagogique

- Daniel Durand « *La systémique* » PUF Que Sais-je ?, 2004 9^{ème} édition (1974, 1^{ère} édition). Cet ouvrage fait le point sur ce sujet avec clarté et concision.
- J.-L. Le Moigne « *La théorie du système général. Théorie de la modélisation* » PUF, 4^{ème} édition, 1994, (1977, 1^{ère} édition). Il s'agit d'une référence incontournable. On trouve en 4^{ème} de couverture, de l'édition de 1994, la phrase suivante « ...l'homme peut alors, à l'aide de ce concept extraordinairement fécond, se construire des représentations de la complexité dans laquelle il doit vivre et agir sans pouvoir ou devoir la mutiler ».
- André Dauphiné « *Les théories de la complexité chez les géographes* » éd., Anthropos, Paris, diffusion Economica, 2003.
- Arlette Yatchinovsky « *L'approche systémique Pour gérer l'incertitude et la complexité* ». Collection formation permanente, ESF éditeur, 2004.

Enfin nous citerons un ouvrage très récent qui nous semble de nature à enrichir les connaissances sur la théorie des systèmes, bien qu'il ne l'évoque pas explicitement.

Il s'agit du remarquable ouvrage de Robert B. Laughlin (prix nobel de physique, 1998) : « *Un Univers différent* », Paris, Fayard, Le temps des sciences, 2005.

Titre original « *A Different Universe* » Basic books, New-York.

« *Nous vivons la fin du réductionnisme ; la fausse idéologie qui promettait à l'humanité la maîtrise de toute chose* ».

Le réductionnisme a en effet permis de comprendre de nombreux phénomènes mais certainement pas la plupart des phénomènes organisationnels.

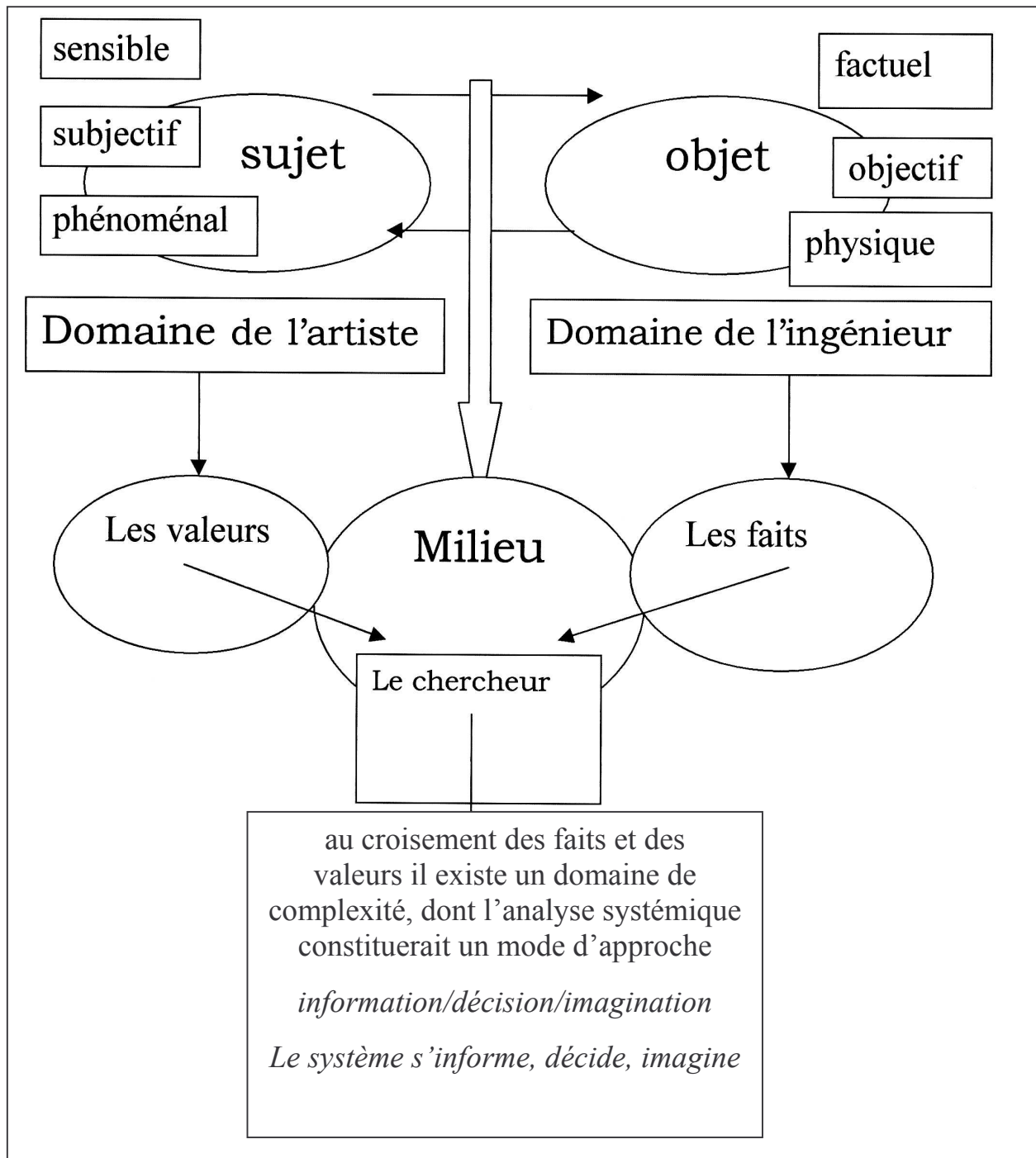
« *Autrement dit, nous pouvons prouver, dans ces cas simples, que l'organisation peut acquérir un sens et une vie bien à elle et commencer à transcender les éléments dont elle est faite* ». Extrait de la préface de l'ouvrage p.17.

En réponse à cette axiomatique, je vous propose, ci-après, de vous libérer de la marque de Descartes.

C. La marque de Descartes : la dichotomie objet-sujet, un défi à la complexité

Un retour sur la dichotomie cartésienne du sujet et de l'objet s'impose pour bien comprendre quelle a été, historiquement la place née au siècle des lumières du scientifique en général et de l'ingénieur, en particulier. Elle s'impose également pour comprendre pourquoi les initiateurs de la théorie des systèmes ont eu autant de difficultés à faire admettre leur vision du monde face à des scientifiques prônant les approches réductionnistes.

« Avec Descartes la vérité est déplacée de l'objectif vers le subjectif, dans la certitude du cogito ». La vérité devient alors certitude détenue par la conscience à partir de laquelle la volonté de se rendre "comme maître et possesseur de la nature devient possible " (Descartes chapitre 5 du Discours de la méthode).



Le domaine de l'ingénieur ou du scientifique est, historiquement, celui du factuel.

L'ingénieur, (le scientifique) est celui qui est capable d'observer et de récapituler les faits, de formuler des objectifs et de tenter de les atteindre en appliquant des lois physiques nécessitant de mobiliser les connaissances scientifiques acquises. L'action de l'ingénieur reste subordonnée au monde des faits, celui de la science et son application la technique, ressource essentielle permettant à l'homme de maîtriser son environnement.

La pensée occidentale a réduit l'être à l'interprétation scientifique du monde, barrant l'accès à toute autre forme de compréhension de la vérité et consacrant la technique pas seulement comme un moyen mais comme un mode de dévoilement (Heidegger), mode unique "qui confond vérité et exactitude" réduisant le monde à l'objectivité mathématique et consommant la séparation de la science et de la pensée.

Quelle est la place de l'analyse systémique dans cette dichotomie

Considérer les relations présentes dans les systèmes ne présume en rien le fait d'aborder le *versant phénoménal*⁶ des choses. Il pourrait être tout à fait satisfaisant de ne considérer que les interrelations intéressant le *versant physique*, les faits, les lois, ce qui est objectif.

Cependant, nous verrons ultérieurement qu'il existe plusieurs niveaux d'approche des systèmes, de leur organisation et de leur fonctionnement : à certains niveaux de complexité on introduit plusieurs échelles de processus :

1. le processus d'information (niveau machine perfectionnée) ;
2. celui de décision (niveau vie),
3. celui d'imagination (niveau humain).

A cette dernière échelle, ce qui était mémoire (type mémoire de l'ordinateur du niveau 1 c'est-à-dire niveau machine) devient souvenir. On franchit la limite virtuelle de l'objet au sujet, nous sommes dans le *versant phénoménal* du monde qui inscrit la sensibilité au programme des événements de même que la considération du beau, relation qui unit l'être à l'objet.

Par ailleurs une des principales propriétés des systèmes c'est la satisfaction d'une finalité : le fonctionnement du système tend vers un but, satisfait un programme qui lui aussi peut présenter plusieurs niveaux de complexité dont certains intègrent la dimension sensible des choses, le domaine des valeurs.

L'émergence de l'éthique dans les relations économie/sociétés est particulièrement significative à ce sujet.

La dichotomie objet-sujet, de même que les démarches réductionnistes qui ont rendu de très grands services au niveau de la recherche scientifique sont désormais dépassées par cette considération systémique de la réalité, à plus forte raison si elle reste subjective.

Pourquoi aborder ces questions en début de parcours ? : par souci de clarté, la prise en compte de la dimension phénoménale des problématiques et de leur complexité constituant le fil d'Ariane de notre raisonnement.

⁶ Métaphore empruntée à Augustin Berque, 1990.

3. Structure, organisation, fonction : le chemin vers la complexité

A. Structure et organisation

a / Quelques exemples

Partons d'un cas simple, le cristal de silice

Le cristal de silice possède une structure c'est-à-dire un certain mode d'arrangement ordonné (avec symétries et répétitions) de ses atomes. Celui-ci est d'ailleurs variable en fonction du système dans lequel s'opère cet arrangement, que l'on appelle système cristallin. Opale, calcédoine (calcédonite, quartzine, lutécite), quartz, tridymite, cristobalite, coésite sont toutes des phases dont la formule chimique est SiO_2 : mais elles se présentent sous des «états» différents en fonction de leur structure cristalline. Celle-ci est subordonnée aux conditions de milieu, en l'occurrence de pression et de température, *variables intensives*, ayant présidé à leur genèse. Les phases minérales qui en résultent, possèdent des caractéristiques propres au niveau de leur architecture moléculaire et au niveau de leurs paramètres physico-chimiques, volume et entropie⁷, *variables extensives* définissant chimiquement la phase minérale considérée. Ces variables intensives et extensives étant liées, dans la formation des phases minérales, par une relation (*i.e.* relation ou formule de Clapeyron $dP/dT = \Delta S/\Delta V$ valable dans des conditions réactionnelles bien définies).

Une structure, la plus simple soit-elle, est une « architecture » une répartition des objets dans l'espace, en réponse à un « environnement » physico-chimique, déterminant un état, lui-même contrôlé par les facteurs du milieu (variables intensives).

Les systèmes en général se dotent d'une structure en réponse à des contraintes extérieures, des facteurs du milieu, variables intensives qui peuvent évidemment n'être pas seulement physico-chimiques. Sauf exceptions, ces structures, ces architectures sont propices à la mise en relation. Les mécanismes réactionnels mis en jeu, en cas de déséquilibre des flux (*voir infra*), peuvent donner naissance à de nouvelles structures : ceci est particulièrement vrai au niveau des réactions physico-chimiques, mais aussi, à une toute autre échelle, au niveau des systèmes pédologiques, géomorphologiques, biologiques et également des systèmes sociaux.

Autre exemple simple emprunté à la géologie

Dans les processus tectoniques qui accompagnent la formation des chaînes de montagne on enregistre des pressions considérables. Si l'on considère l'évolution des roches présentes à la racine de ces chaînes (roches métamorphiques) et celles des minéraux qui les constituent, on constate que, sous l'influence d'un changement des conditions de milieu, (diminution de température et augmentation de pression) la phase minérale sillimanite Al_2SiO_5 , silicate d'alumine caractéristique des faciès de HT (haute température) et BP (basse pression), se transforme en disthène, silicate d'alumine caractéristique des HP (haute pression). Ceci se réalise sans changement de formule structurale (Al_2SiO_5) mais avec modification des variables extensives, entropie et volume, propres à chaque phase. Parallèlement on enregistre une modification du système cristallin : réarrangement de l'architecture moléculaire susceptible de répondre au climat des HP (la sillimanite cristallise dans le système orthorhombique et le disthène dans le système triclinique).

⁷ l'entropie se mesure en joules par degré kelvin, J.K^{-1}

Il y a changement de structure et évolution du système en fonction des conditions du milieu.

Un exemple plus complexe : revenons à la méduse

Avec la méduse, on devrait dire les cnidaires tant les formes et les états (larvaires, fixés ou libres) sont variés et nombreux, nous abordons un exemple plus complexe. La méduse, forme libre et pélagique, est un être vivant à symétrie radiale, dont la forme n'est qu'une représentation d'un ensemble polymorphe, constituant un véritable système au sein duquel entrent ce que nous appelons « coraux » ou « polypiers » bien que ceux-ci n'aient pas de forme libre bien définie, de type méduse. La structure de ces différentes formes reste finalement assez semblable quant à la distribution des différents organes, mais chaque forme (larve *planula*, forme polype et forme méduse) répond à un « état » et une fonction précise elle-même subordonnée à un niveau d'organisation.

b/ Structure et traits structuraux

Un système quel qu'il soit, du plus simple au plus complexe, comprend toujours des traits structuraux que l'on peut classer en quatre catégories :

1. Des frontières ou limites

Elles séparent le système du monde extérieur : ces frontières sont souvent des lieux d'altération (exemple les minéraux altérés en leur périphérie), de crise (les frontières d'un état), de conflits (les remparts d'une ville, les zones de banlieues), de défense (les cnidoblastes ou cellules urticantes de la méduse) mais aussi des lieux d'échanges de matière, d'énergie et d'information (limite du réseau de communication).

2. Des éléments, composants ou constituants

La notion d'élément reste sujette à discussion car de signification variable en fonction du niveau d'échelle considéré. Si l'on considère un système paysager quelconque l'un des éléments constitutifs du paysage observé, du fait de la distanciation, peut, lui-même, être composé d'un ensemble d'éléments : par exemple une maison, un bouqueton ou une rivière.

La notion de constituant indépendant, utilisée en chimie rend bien compte de ce que pourrait être l'élément d'un système (alors que paradoxalement est appelé « élément », en chimie, tout corps entrant dans la classification de Mendeleiev).

La notion de constituant indépendant nourrit celle de variance d'un système donnée par la règle des phases de Gibbs :

$$\omega = n + v - \Phi$$

avec ω la variance d'un système,
n le nombre de constituants indépendants,
v le nombre de variables intensives
et Φ le nombre de phases.

Exemple le système réactionnel
sillimanite (Al_2SiO_5) = disthène (Al_2SiO_5)

dans un système où v est égal à deux (Température et Pression), n égal à 1 (Al_2SiO_5), Φ égal à deux par définition, la variance sera égale à 1. A l'équilibre du système réactionnel, pour une valeur donnée de la température il n'existe qu'une seule valeur possible de la pression⁸.

⁸ La notion de variance d'un système est très importante en géologie et objet d'une discipline mal connue mais très riche au plan de la compréhension des phénomènes : il s'agit de l'analyse géométrique, base de l'affigraphie.

En fait est appelé élément d'un système tout objet participant de sa constitution, à l'échelle considérée, choisie par l'observateur comme pertinente en fonction de son niveau de préoccupation.

Ces éléments ou composants peuvent être identifiés, dénombrés, classés, répertoriés. Ils sont caractéristiques à chaque système et de nature très différentes en fonction de l'organisation du système et de sa finalité.

3. Des réservoirs

Ils sont le lieu de rassemblement des éléments.

Ils peuvent stocker de la *matière*, de l'*énergie*, de l'*information*.

Exemple de stockage de la *matière* : l'atmosphère, les sédiments, les lacs et l'océan, les châteaux d'eau ; les silos à grain, les grands magasins etc

Exemple de stockage de l'*énergie* : les réservoirs d'hydrocarbures, les houillères, à l'échelle de l'organisme humain, le foie (du fait de sa fonction glycogénique), les graisses ;

Exemple de stockage de l'*information* : la mémoire d'ordinateur, la mémoire du cerveau, les bibliothèques, la cinémathèque, les CD et DVD etc

La banque serait un réservoir d'un type un peu particulier du fait de la non appartenance directe des flux monétaires à l'une ou l'autre des catégories ci-dessus bien que la monnaie permette en fait les échanges donc la circulation de l'information.

4. Un réseau de communication

Il permet l'échange d'énergie, de matière et d'information entre les différents éléments du système et entre les différents réservoirs.

Ces réseaux prennent des formes diverses : tuyaux, câbles, fils, nerfs, veines, artères, routes, canaux, lignes électriques, fils téléphoniques, ondes hertziennes etc.

C'est grâce au réseau de communication que circule l'information. Il peut prendre des formes les plus diverses et se trouver en relation avec un centre décisionnel (dans les systèmes les plus élaborés) : ces centres de décision permettent aux régulations de se réaliser. Celles-ci fonctionnent comme des vannes et elles vont principalement jouer sur les flux de matière et d'énergie.

Nous reviendrons ultérieurement sur cette notion déjà largement abordée de flux de matière, d'énergie et d'information. Toutefois il paraît particulièrement important de comprendre que le maintien d'un système (c'est-à-dire le maintien de sa structure) est entièrement conditionné par les équilibres des flux entrant et sortant, tout en considérant le rôle joué par les mécanismes régulateurs et les réservoirs.

Enfin tous les systèmes ouverts sont sensibles aux contraintes extérieures : celles-ci imposent au système de remanier en permanence sa structure : cet aspect particulier de la dynamique des systèmes constituera le fil conducteur de la deuxième partie de ce cours.

Remanier une structure impose une nouvelle organisation : c'est ce concept que nous allons maintenant aborder.

c/ Organisation et niveaux d'organisation

1. L'exemple de l'organisation du système sol

Après la méduse dont l'organisation répond à l'évidence à des fonctions précises affectées à ses différents états (adulte, larvaire et fixé), prenons l'exemple du sol.

Le sol, dont la fraction minérale est principalement constituée de silice (présente dans les grains de sable, de limon et dans le réseau structural des minéraux argileux) comprend différents niveaux d'organisation eux-mêmes subordonnés à l'existence d'emboîtements structuraux perceptibles soit à l'analyse morphologique soit à l'analyse micromorphologique voire à l'analyse physico-chimique (Camuzard, 2000).

Agrégats, pédès, horizons, solums, catenas (séquences de sols) sont autant de niveaux structuraux d'échelle spatiale croissante correspondants à des niveaux d'organisation bien définis. Chacun de ces niveaux d'organisation répond à une fonction : échanges au niveau des agrégats (concept de complexe argilo-humique), structuration pédogénétique au niveau des horizons, distribution dans l'espace et relations avec le paysage au niveau des catenas.

Les limites du système sont donc définies par les niveaux de structuration réels, auxquels aboutissent, à plusieurs niveaux d'échelle, les évolutions liant dans un même ensemble de processus roches/sols/paysages.

Ces évolutions s'établissent à deux niveaux différents :

-(i) celui du sol, lui-même, c'est à dire du solum, défini par un ensemble de caractères à composantes uniquement pédologiques, dont l'évolution aboutit à l'émergence de niveaux structuraux qui sont autant de niveaux fonctionnels :

1. le minéral (exemple des minéraux argileux) ;
2. l'assemblage argilo-humique ;
3. l'agrégat, significatif d'un état de stabilité ;
4. le pède, (fragment de motte de terre) résultat d'un potentiel d'auto-organisation ;
5. l'horizon, produit d'une différenciation fonctionnelle ;
6. le profil, niveau de structuration supérieur, défini par la succession des horizons ;
7. la catena ou chaîne de sols associant une certaine succession de profils.

-(ii) celui des relations du sol avec le paysage, en tant que géosystème ; le sol est un élément d'une structure plus vaste, à caractère géomorphologique, dépendante de facteurs exogènes et endogènes, exemples de niveaux structurels :

1. la toposéquence : distribution des sols le long d'une pente
2. l'unité de paysage
3. le bassin versant.

2. L'émergence de la dimension « paysage »

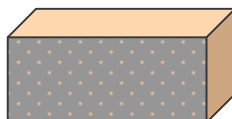
A ce niveau de l'exposé l'émergence du « paysage » n'est évidemment pas gratuite : elle induit à l'évidence une dimension supplémentaire qui est celle de la relation sensible, du phénoménal, pour reprendre le concept évoqué en début de cours. En effet le paysage est objet de perception et n'a pas de réalité en dehors de celui qui l'observe. S'agissant du sol on passe insensiblement des objets au sujet. Le paysage n'est pas qu'objet à protéger ou restaurer mais aussi et surtout sujet, domaine de la relation des hommes à l'espace : ambivalent, le paysage est *physique et phénoménal*, (Berque, 1990), *empreinte et matrice* (Berque, 1996).

Approches emboîtées du système sol

1. Géologique

sol = régolithe = sur couverture d'altérites
(colonisation par la biosphère et transformations faibles)

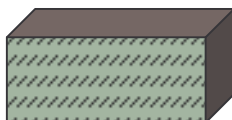
Le sol constitue la partie superficielle du manteau d'altération avec lequel il peut se confondre



2. Agronomique

sol = support permettant la croissance des végétaux :
colonisation par la biosphère et transformations fortes

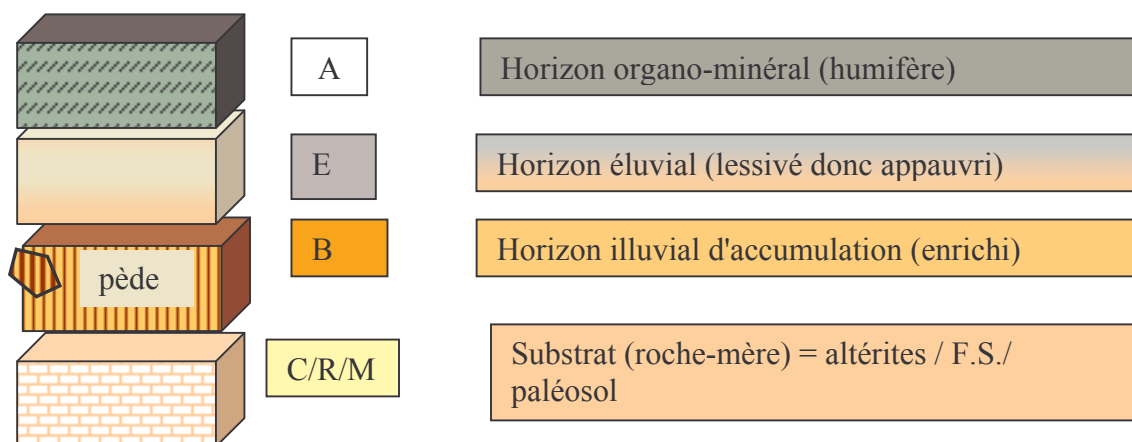
Sol = potentiel agronomique \Rightarrow complexe argilo-humique



3. Pédologique

le sol = milieu naturellement organisé, à plusieurs niveaux, en unités structurales élémentaires : pèdes, horizons...

Sol = potentiel d'organisation \Rightarrow observable à plusieurs échelles

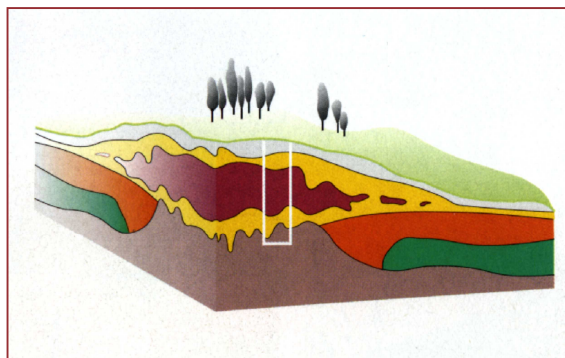


4. Ecologique

Sol = Milieu vivant, triphasique
au carrefour de la lithosphère de
l'atmosphère et de la biosphère

= convergence de

- matière
- énergie
- information



5. Paysagère Sol = élément d'une totalité phénoménale

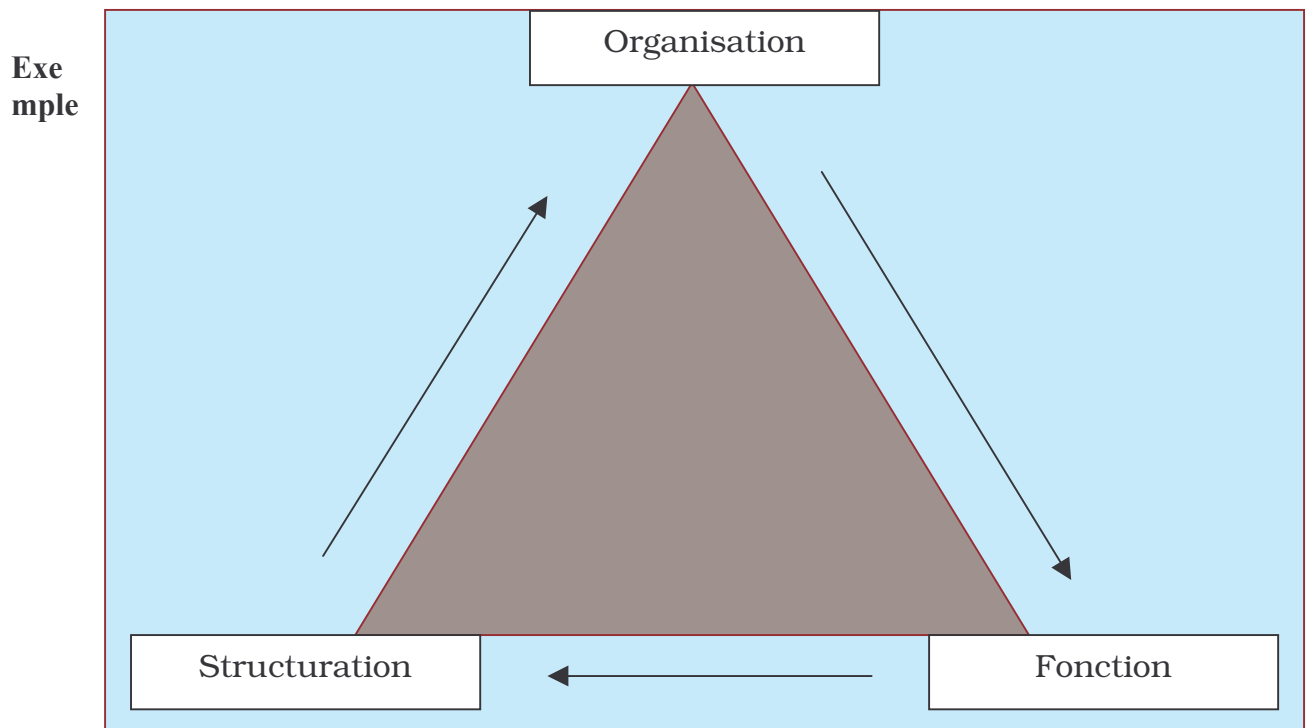
B. Organisation et fonction : deux notions indissociables et interférentes

a/ Organisation : c'est le concept central de la systémique qui recouvre un état et un (ensemble de) processus.

Toute organisation comporte :

- un aspect structurel : une architecture, un organigramme ;
- un aspect fonctionnel. : la satisfaction d'une fonction, mis en œuvre de flux, réponse à un besoin.

Fonction : toute organisation contribue à une fonction satisfaite à différents niveaux de structure.



Le système possède une structure, une organisation, une fonction.

Une structure : ensemble perceptible à différents niveaux d'échelle, identifiable du fait du mode d'agencement des éléments constitutifs avec symétries et répétitions ;

Une organisation : disposition particulière et imbrications des structures visant à satisfaire une fonction ;

Une fonction : correspondant à une convergence des processus vers la satisfaction d'une finalité, en l'occurrence la croissance des végétaux.

On observe donc des parties vers le tout une complexité croissante, des niveaux emboîtés.

Nous examinerons ultérieurement la notion de complexité et dans l'immédiat il nous appartient de bien comprendre comment jouent ces trois notions complémentaires et afin d'illustrer ce propos nous allons prendre un deuxième exemple relatif au domaine du paysage.

b/ Un exemple illustrant le jeu de ces notions (structure, organisation, fonction) : le système (paysage) bocager de la Gâtine poitevine

Présentation

La Gâtine est un pays situé en Poitou, région de Parthenay, dans le département des Deux-Sèvres. Elle bénéficie d'une triple unité, physique (géographique et géologique), historique et culturelle, expliquant les réflexes identitaires forts des habitants.

Il s'agit d'un pays de tradition, berceau d'une race bovine de qualité, la Parthenaise, parfaitement intégrée au paysage et d'une variété de pomme à couteau (variété reinette Clochard ou reinette de Parthenay) spécifique de ce terroir.

Le bocage fut principalement créé à la Renaissance après que les seigneurs locaux eussent tenté de regrouper leurs terres suite aux désordres de la guerre de Cent ans (Merle, 1958)⁹.

Les limites de ce pays sont en partie géologiques (le massif ancien, terminaison sud du massif armoricain), mais surtout historiques (la limite du territoire des seigneuries) et culturelles (la date d'entrée en jouissance des terres et les modes de faire valoir liés à l'existence de la métairie).

La structure bocagère est définie par ses éléments et leur disposition spatiale

Différents éléments et leur agencement dans l'espace définissent une structure paysagère, qualifiée de bocagère :

- l'existence des haies aux morphologies et à la composition variables en fonction de l'usage qui en est fait (voir infra) ;
- un habitat dispersé en hameaux, des bourgs modestes entourés de jardins (*l'ouche*) et de petits bâtiments d'élevage (*le têt*) ;
- de nombreux petits monuments ruraux (calvaires, oratoires, lavoirs, etc)
- des châteaux (le plus souvent médiévaux) toujours habités par de petits nobles terriens¹⁰
- un réseau de chemins, parfois creux (pour les plus anciens), complexe et hiérarchisé ;
- des parcelles cultivées aux formes spécifiques selon la qualité de la terre, closes par une traditionnelle barrière en bois de châtaignier aux formes immuables (*la clle*) ;
- des forêts en limite de finage (jadis territoires d'affouage et désormais de chasse) ;
- de nombreuses mares (en voie de disparition) et étangs (en augmentation) ;
- une infinité de cours d'eau aménagés, divergeant vers plusieurs exutoires ;
- d'anciens moulins hydrauliques disposés le long de ces ruisseaux ;
- des sites d'extraction de la roche nombreux et variés ;
- une infrastructure rurale où domine la laiterie (coopérative) ;
- des routes étroites et tortueuses ;
- une composition du sol de nature globalement argileuse (sols hydromorphes). ;
- un microclimat relativement humide et froid qui interdit le vignoble.

L'organisation paysagère du bocage répond à des finalités

Toute organisation répond à une fonction induite par une finalité.

⁹ MERLE L (1958) - *La métairie et l'évolution agraire de la Gâtine poitevine de la fin du Moyen-Age à la Révolution.*. Les hommes et la terre, II, Ecole pratique des Hautes Etudes, VI^{ème} section. Centre de recherches historiques, S.E.V.P.E.N. éd., Paris, 252 p. [ouvrage publié avec le concours du CNRS]. [Note de Moriceau, 1999, Ref. 734 *Op. cit.* Sous l'impulsion de la noblesse propriétaire, concentration agraire et remembrement foncier autour de Secondigny (Deux-Sèvres), dans le cadre du bocage, au cours du XVI^e et du XVII^e siècles. Travail pionnier, bien connu, sur la transformation des paysages et ses conséquences sociales dans les campagnes de l'Ouest. Riche d'informations aussi sur les systèmes de culture.]

¹⁰ que les habitants appelaient avec considération « le Monsieur ».

Dans le cas présent, les différents niveaux d'organisation du bocage convergeraient vers les *finalités* suivantes qui restent traditionnelles:

1. **la production agricole** : superficie des champs modeste (en rapport avec le temps de travail), leur disposition au regard de l'usage, chemins creux réservés au cheminement des animaux, haies constituées d'espèces défensives permettant le gardiennage, mares assurant l'abreuvement etc.
2. **l'affirmation du droit sur la terre** : la haie constitue la matérialisation d'une limite de propriété ;
3. **le choix d'un mode de vie** : il sera conforme à la tradition et à la culture locale et inscrit dans un contexte relationnel très imprégné de l'emprise paysagère (la haie isole et l'isolement est un obstacle à la communication) ;
4. **le besoin de repères** : l'aspiration à une certaine forme de vie sociale doublée du besoin de spiritualité amène les habitants à multiplier les petits édifices ruraux souvent religieux (oratoires, calvaires, croix) mais aussi utilitaires (lavoirs, bornes sculptées, abris de cantonniers).

Mais, face à la prise de conscience des menaces qui pèsent sur la permanence des écosystèmes, certaines *finalités* relatives à l'entretien et à la préservation du bocage apparaissent nouvellement émergentes :

5. **la gestion d'un patrimoine** « naturel » et « culturel » hérité des anciens ;
6. la prise en compte d'une certaine **biodiversité** fragile et incertaine ;
7. la prise de conscience du lien existant entre **appartenance sociale et paysage**.

Les fonctions du bocage sont directement héritées de ces finalités et sont perceptibles à plusieurs niveaux emboîtés

Le bocage est dominé par les haies aux compositions et fonctions multiples.

La haie elle-même peut être considérée comme un élément structurant du système dont la fonction principale serait de matérialiser les limites de propriété.

Mais elle constitue un système en elle-même, avec ses fonctions propres, qui deviennent services dès lors que l'on se place du point de vue anthropique de la satisfaction de besoins. Ceux-ci sont directement hérités des objectifs de production, donc de la volonté des créateurs ou des aménageurs.

Quelles sont ces services (ou fonctions) (après enquête auprès des usagers, Camuzard, 1979):

1. fourniture d'énergie (bois de chauffage, fagots ou bûches)
2. alimentaire (fruitiers)
3. fourniture de bois d'œuvre (pour la fabrication des outils des meubles ou des sabots)
4. gardiennage (la clôture artificielle n'est pas nécessaire)
5. brise-vent (les plateaux sont relativement ventés (vent d'ouest dit de galerie)
6. assainissement (l'hydromorphie est présente sur tout le territoire)
7. matérialisation d'une limite (référence aux premières restructurations foncières de la Renaissance)
8. protection du gibier (que l'on peut ensuite chasser)
9. dissimulation (pour vivre heureux vivons cachés)
10. apport d'ombre l'été.

Il y a une relation directe entre les éléments du système haie (les différentes espèces végétales), son organisation (mode de traitement de la haie) et les fonctions en liaison avec les finalités, ce que traduit le tableau de correspondance sommaire esquissé ci-dessous :

Exemple de la haie :
tableau de correspondance entre organisation / fonction / espèces

	Organisation (plantation et traitement)	Haie traitée en hautes tiges et taille en têtard				Taille basse et plesse			Fruitiers
	Espèces = éléments	Orme et chênes	Châtaignier	Aulnes Saules Frênes	Erables	Aubépines Pruneliers	Fusain Troène Sureau	Coudrier Ronces	Poiriers Pommiers Pruniers Noisetiers
Fonctions principales	Bois de chauffage	+		(+)	(+)				+
	Alimentaire		+					+	+
	Bois d'œuvre Sabots	+		+	+				
	Gardiennage					+	+	+	
	Brise-vent	+	+	+	+				
	Assainissement			+			+		

Mais la haie en tant qu'élément du paysage de bocage contribue à lui donner son caractère : on parle alors d'élément structurant. L'organisation et les fonctions du bocage dépassent largement celles de la haie, mais elles resteront en étroite relation avec celle-ci : il y aura convergence des fonctions à différents niveaux de temps et d'espace ne serait-ce que, au total, pour satisfaire une finalité orientée principalement vers la production agricole.

Conclusions

Cet exemple montre que structure, organisation et fonctions sont étroitement liées : ils définissent le système et permettent son identification. Structures et fonctions restent globalement les mêmes depuis des siècles : seules les composantes (éléments) du système se sont renouvelées et les prises de conscience ont évolué. Le regard sur les choses est différent mais procède d'une continuité, d'une volonté de pérenniser, d'assurer la permanence des formes sachant que l'homme est tout entier contenu en elles. Cette permanence des formes est appelée stabilité dynamique. Elle est permise par la circulation et l'équilibre des flux.

C'est bien d'identité dont il s'agit. La Gâtine poitevine a toujours su résister aux sirènes du remembrement : ce n'est pas un hasard.

C. Interaction/globalité/complexité : trois concepts fondamentaux de la théorie des systèmes autour de celui d'organisation

a/ Interaction

Elle est le fait d'une double action.

Elle prend des formes complexes au fur et à mesure de la multiplication des structures.

Une forme particulière d'interaction est constituée par la rétroaction (feed-back exemple des systèmes hormonaux). Dans le même ordre d'idée on évoque la notion de bouclage récursif faisant intervenir des relations de causalité circulaire (Morin) et des interactions emboîtées.

b/ Globalité

La systémique est héritière du paradigme structuraliste qui considère que la structure ou l'organisation d'un système rend plus compte de son fonctionnement et de ses transformations que le seul ensemble de ses composants.

Un système n'est pas une somme d'éléments : un système n'est pas réductible à ses parties. Concept de holon (Koestler) d'intégron (Monod). Le tout implique l'apparition de qualités émergentes que ne possèdent pas les parties.

La notion d'émergence conduit à la notion de hiérarchie des systèmes.

c/ Complexité

La systémique ou science des systèmes est souvent assimilée à la science de la complexité, car elle s'est constituée à partir des bases définissant le principe de complexité.

Nous avons vu que la science classique a construit ses principes théoriques, ses lois et ses modèles à partir des principes de causalité, du réductionnisme, du primat de l'objet par rapport au sujet. La systémique introduit à l'inverse la dimension téléologique, le primat du sujet, de la relation, le couplage holisme et réductionnisme.

Evidemment cette intention ne se satisfait guère du simple déterminisme et des relations de causalité (flèche cause/effet) de la science classique. Elle nécessite que l'on fasse appel au concept de complexité largement explicité par Edgar Morin (épistémologie génétique).

Mais la complexité n'est pas la complication : il y a entre les deux différence de nature.

La complexité d'un système tient à trois séries de causes (Durand) :

1. celles inhérentes à la composition même du système ;
2. celles provenant de l'incertitude et des aléas propres à son environnement ;
3. celles qui tiennent au rapport ambigu entre déterminisme et hasard, entre ordre et désordre (Dupuy) ; entre ordre des causes et ordre des fins (Darwin).

4. La circulation des flux dans le système, conditions de stabilité dynamique

A. Les trois grands types de flux : matière, énergie, information

Prenons l'exemple du moulin hydraulique et l'aménagement de la rivière comme exemple d'élément structurant, lui-même, en quelque sorte, sous-système du paysage bocager, à l'image de la haie traitée ci-dessus. Il offre l'occasion de mieux faire comprendre la différence entre structure et organisation ; en ce sens que l'organisation suppose l'existence de flux qui traversent les différents niveaux structurels impliqués.

On observera que préside à leur fonctionnement la réalité de trois flux différents exerçant simultanément leur action :

- des flux de matière,

des flux entrant : le grain, l'eau et divers objets de meunerie
des flux sortant : l'eau, la farine et divers objets de

ils assurent la permanence de la structure, préalable à toute action finalisée, à la réalisation de toute fonction ;

- **des flux d'énergie** : la production de l'énergie nécessaire à l'action de la meule, constituant en fait l'exploitation d'un potentiel gravitaire, mais aussi l'énergie nécessitée par le transport du grain et celui de la farine ;

ils assurent la permanence de la fonction, celle de moudre le grain, répondant à une finalité, celle d'obtenir de la farine pour faire du pain ;

- **des flux d'information** : les messages oraux ou écrits, les bruits de la campagne, les signes divers de la nature susceptibles d'être interprétés en tant qu'éléments d'information tels que l'imminence d'une crue ou d'une sécheresse ;

ils assurent le maintien de l'organisation en place et jouent le rôle de régulateur en jouant en retour sur le système.

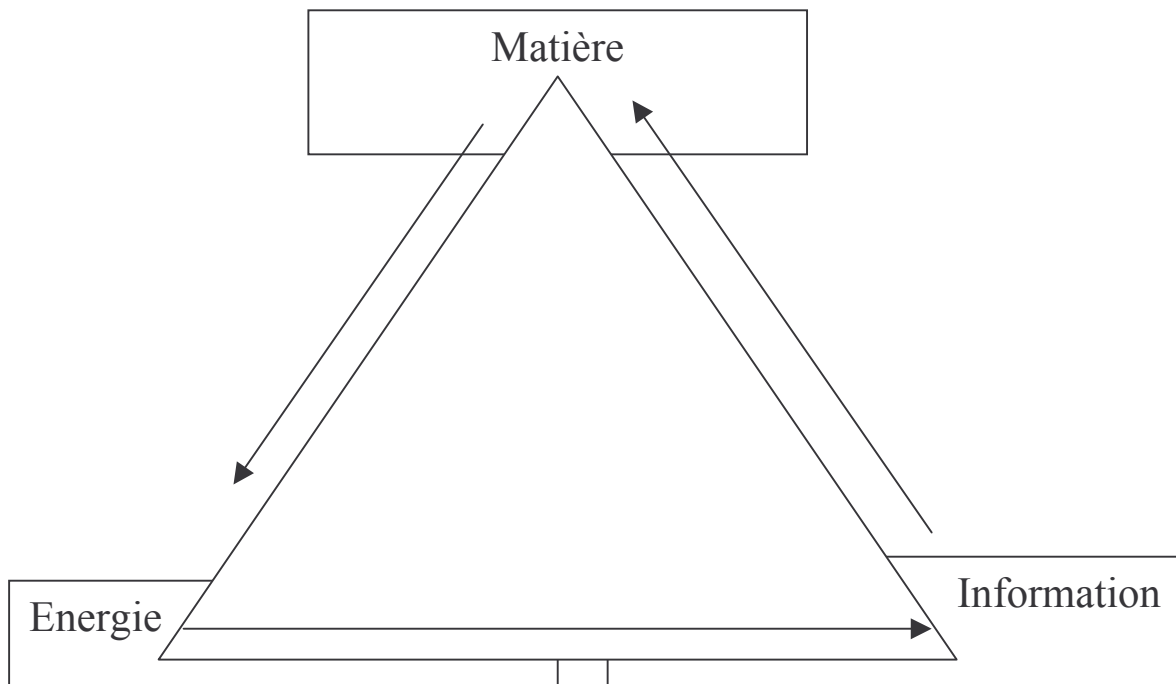
B. Flux et stabilité des systèmes

Nous avons, dans les exemples précédents, bâti notre approche des systèmes grâce à une construction triangulaire reposant sur les rapports existant entre structure, organisation et fonction. Toute structure exige un agencement spécifique de la matière (voir l'exemple simple des structures cristallines), toute fonction mobilise de l'énergie, toute organisation nécessite des échanges d'information. L'exemple du moulin hydraulique dans son contexte paysager (l'aménagement spécifique de la rivière) est significatif à cet égard.

a/ Rôle de l'information dans la stabilité des systèmes

L'information est une dimension nécessaire à la stabilité du système : il faut réguler les flux d'entrée et de sortie et anticiper (existence d'un ou plusieurs mécanismes d'anticipation ou/et de régulation) afin d'assurer la pérennité du système. Les mécanismes régulateurs jouent en priorité sur les flux de matière (l'eau et le grain dans

l'exemple choisi) mais aussi sur les flux d'énergie dans la mesure où il y a proportionnalité entre ces deux dimensions.



La circulation de ces trois flux, matière, énergie et information, caractérisent la nature des échanges entre les systèmes et leur environnement (systèmes ouverts évidemment). C'est cette circulation et les phénomènes de compensation existant entre flux entrant et flux sortant qui assurent la permanence, la stabilité, (l'équilibre au sens large du terme) du système. Cette permanence est inscrite dans sa morphologie (permanence des formes). Des contraintes extérieures peuvent modifier le système qui adaptera sa structure aux nouvelles conditions du milieu. En cas de contraintes trop fortes, il y a franchissement d'un seuil, dit de résilience, et le système disparaît, dans sa morphologie primitive, pour faire place à autre système caractérisé par d'autres états ou bien disparaître.

La méduse est un être vivant dont la symétrie inspire la simplicité : c'est pourtant un être complexe et structuré, organisé et fonctionnel dont les rapports avec l'environnement se jouent à deux niveaux très perceptibles : le premier est celui de la matière, le second est celui de l'énergie. Un niveau tout aussi indispensable mais moins immédiat, celui de l'information est évidemment à prendre en compte. Le passage de différents états (larvaires, adulte ou fixé) est fonction des conditions du milieu : il n'y a stabilité et permanence des formes que dans des conditions écologiques précises répondant aux exigences physiologiques de l'animal.

Nous avons donc à faire à un individu complexe, susceptible de changer d'état, soumis étroitement aux conditions du milieu. Mais quelle est l'essence de sa complexité ? Tel est posé le problème de la systémique et qui justifie à nos yeux le titre de cet exposé..

Nous formulerons l'hypothèse que c'est peut-être au niveau de l'information que se joue l'essence de cette complexité car l'information est subordonnée à une intention : la description des différentes caractéristiques biologiques de la méduse montrent que tout converge vers une optimisation de la réception de signaux extérieurs joints à une remarquable aptitude à la dissimulation (ou son contraire) et au déplacement (voir encadré ci-joint).

Quelques caractéristiques biologiques des méduses : de l'importance des facteurs environnementaux et des systèmes d'information

Morphologie et système locomoteur

Sans squelette, ni cerveau, dépourvue de poumons et de sang, la méduse est un être mou sans queue ni tête, sans droite ni gauche, rangé au début de la classification zoologique, juste après les éponges. Ni vertébré à squelette, ni crustacé à carapace, ni mollusque à coquille, la méduse est simplement formée d'un derme tapissé de muscles circulaires striés au niveau de l'ombrelle et de muscles radiaux au niveau des tentacules. Les muscles circulaires sont très puissants et lui permettent de se propulser. En ce qui concerne les tentacules, souvent en multiple de quatre, ils sont extrêmement contractiles et peuvent s'étirer jusqu'à dix fois le diamètre de l'ombrelle.

Système sensitif et de défense

Pas de cerveau, mais un formidable réseau de cellules nerveuses et de fibres, qui ont même servi de modèle aux scientifiques pour l'étude et la compréhension du passage de l'influx nerveux. Ni droite ni gauche ? Sa symétrie radiaire par rapport à l'axe central qu'est le manubrium*, la distingue des autres animaux à symétrie bilatérale. Mais, si elle n'a pas d'orientation, la méduse possède en revanche des organes de sens : des yeux ou ocelles plus ou moins complexes selon l'espèce et des organes d'équilibration, les statocystes, qui captent les changements d'orientation grâce à un système de cellules ciliées. Chez les méduses les plus évoluées, ces deux types d'organes sont regroupés en un organe unique, la rhopalie, qui est même dotée d'une fossette olfactive. La méduse a un pouvoir urticant qui lui vaut sa place dans l'embranchement des Cnidaires, du grec « knidé » qui veut dire ortie. Les cellules urticantes (nématocystes) sont régulièrement réparties sur l'ectoderme des tentacules ou groupées en bouton, en anneau ou en ligne. Elles sont vitales pour la méduse puisqu'elles constituent son arme de pêche... à la traîne ! mais aussi un moyen de défense efficace pour contrer l'absence de carapace.

Système digestif

Sa bouche s'ouvre à l'extrémité libre du manubrium et donne directement accès à la partie centrale de l'estomac celui-ci se prolongeant par rayonnement dans l'ombrelle, à l'image des baleines d'un parapluie. Ces prolongements, ou canaux radiaux se déversent dans un canal circulaire marginal, faisant le tour de l'ombrelle. Les produits de la digestion circulent des canaux radiaux jusqu'au canal marginal puis, le courant s'inverse et les produits d'excrétion sont ramenés vers la bouche par où ils sont expulsés, sous forme de pelotes de mucus. L'estomac de la méduse est aussi lié à la fonction de reproduction, ce qui est caractéristique des organismes primitifs.

Système reproducteur

Les méduses sont des animaux sexués. Pour des genres comme *Clytia*, mâles et femelles libèrent spermatozoïdes et ovules dans l'eau qui vont alors fusionner pour former un œuf. Celui-ci va ensuite libérer une larve appelée planula, qui va tomber au fond de l'eau, se fixer sur des rochers ou tout autre support et se transformer en une tige : le polype ou hydraire. Les polypes sont sexués, il existe des colonies de mâles et de femelles, mais chaque colonie se reproduit par multiplication asexuée et finit par donner, toujours par bourgeonnement, une hydroméduse qui va se détacher. Pour des méduses comme *Pelagia*, seuls les spermatozoïdes sont libérés dans l'eau. Les femelles les récupèrent et pondent alors des œufs fécondés. *Aurelia* a encore développé un système différent : les œufs fécondés migrent dans des poches incubatrices situées au niveau des bras oraux, et c'est alors des larves qui sont pondues. Un cas d'hermaphrodisme a été décrit chez *Chrysaora*, tandis que le cycle de vie de certains hydraires ne passe jamais par le stade de méduse. On parle de phase de régression de la méduse.

Notes recueillies sur internet

b/ Le couple information / besoin, moteur des systèmes

Un constat tout d'abord : l'information dépend de celui qui la reçoit.

L'information qui n'émerge pas de son contexte est inutilisable, voir la nouvelle de Jorge Louis Borges, la Bibliothèque de Babel, (*Fictions*, Gallimard, 1957) : inutilisable, elle est dépourvue de sens.

Pour que l'information ait un sens, il faut qu'elle ait, pour celui qui la reçoit, une signification, en d'autres termes qu'elle entre dans une relation, avec un amont et un aval à cette relation. La méduse reçoit l'information de la présence d'une proie, dans son environnement. Elle s'organisera alors pour la consommer, après avoir, par un système de relations appropriées mettant en jeu différents aspects de son fonctionnement, identifier l'objet à consommer.

Le savoir, l'intention et le besoin

« *Ce sont les fumeurs qui repèrent les bureaux de tabac* »

Le savoir est la condition nécessaire à une information signifiante : le fumeur sait que l'on trouve des cigarettes dans un bureau de tabac. La perception du bureau de tabac en tant qu'objet signifiant, est subordonnée à l'intention de fumer. Autrement dit l'intention s'exerce si l'information est reconnue (perçue) (disons, en généralisant, si elle entre dans notre culture).

Les bureaux de tabac existent pour tout le monde mais ils ne sont perçus en tant que tels par les fumeurs : la perception tient compte de l'intention que contient la représentation de l'environnement.

Cette intention demeure enfin subordonnée, chez les êtres vivants à la satisfaction d'un besoin, lequel est lui-même nécessaire à la réalisation d'une fonction, ce qui renvoie au premier paragraphe de cette introduction. En effet un système est conditionné par la traversée de flux de matière et d'énergie et le *besoin* n'est, chez les êtres vivants, que la traduction (souvent sensorielle) d'un relatif déséquilibre entre les entrées et les sorties de ces flux.

Le besoin et l'organisation des systèmes

Une organisation répond à une finalité : nous l'avons analysé dans le cas de la haie et de la structure bocagère. Les systèmes de production intègrent et entretiennent une structure bocagère (hennuyère) afin de satisfaire à des fonctions (de production par exemple) répondant à des finalités justifiant un mode particulier d'organisation (de mise en place, de traitement, de travail etc.

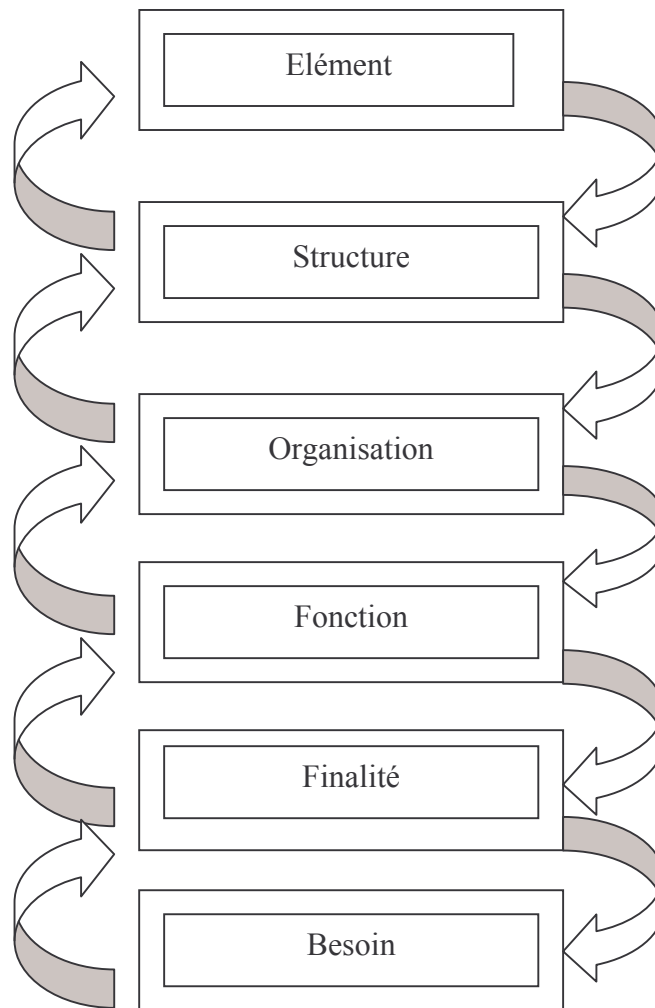
De même dans l'exemple du moulin hydraulique il est clair que le système ne fonctionnerait pas, l'organisation nécessaire ne se mettrait pas en place si aucun besoin ne s'exprimerait, en l'occurrence celui de moudre du grain pour produire de la farine et fabriquer du pain pour nourrir la famille. Cette cascade de besoins en elle-même implique la mise en place d'une organisation hiérarchisée, ordonnancée.

En quelque sorte et sans mauvais jeu de mots la faim justifie les moyens, l'organisation permettant la satisfaction de fonctions lesquelles nécessitant la mise en place de structures adaptées.

René Thom (1988) dirait que la faim, besoin nécessitant que s'établisse une organisation afin de la satisfaire est de l'ordre de la prégnance, alors que les éléments composant les structures seraient de l'ordre de la saillance.

C'est précisément cette prégnance qui préside à la destinée des systèmes.

D. Hiérarchisation fonctionnelle des systèmes ou emboîtements des différents niveaux de réalité (ou d'approche)



Nouvelle définition d'un système

Un *système* est un ensemble d'*éléments* ordonnés selon une architecture appelée *structure* au sein d'une *organisation* répondant à une *fonction* satisfaisant à une *finalité* générée par un *besoin*.

5. Dynamique des systèmes

A. Typologie des relations dans un système

Reprenons l'exemple de la méduse : elle constitue un système dont les limites seraient constituées des membranes en contact avec le milieu ambiant.

L'organisation même de l'adulte méduse, sa croissance à partir de l'état larvaire (*planula*), répond à un schéma de développement embryologique (et physiologique), une spécialisation des tissus qui prend en compte la destinée finale de l'individu et passe par différentes étapes de développement : c'est l'ontogenèse. Différents processus emboîtés se conjuguent avec harmonie pour aboutir à cet être simple et complexe à la fois que constitue le cnidaire.

Ces épisodes de développement puis de maintien en vie de la méduse demandent à l'évidence que s'établissent des relations à l'intérieur du système et entre le système et l'extérieur : ces relations ne s'établissent pas d'élément à élément. En fait chacun de ces éléments appartient à une classe, que Delattre (1971) appelle « classe repère » dont le nombre peut-être fini ou infini en fonction de la complexité du système. Les interactions entre les éléments se réduisent à des interactions en les classes repères du système : exemple dans le cas de la méduse, le cnidoblaste et la proie.

Les relations appartiennent à trois types fondamentaux (Delattre, 1971) :

a/ Les relations topologiques :

elles sont dépendantes de l'existence d'un potentiel, (qui est une fonction du temps) ;
elles sont conformes à une certaine finalité géométrique des processus ;
elles caractérisent ce qui est de l'ordre de l'organisation des éléments du système.

b/ Les relations d'ordre :

elles définissent la hiérarchisation des processus à différents niveaux d'échelle.

Exemple : le sol est un système parce qu'il est formé d'un ensemble d'éléments en interaction qui peuvent être répartis dans un nombre fini ou "infini" de classes-repères (Delattre, 1971).

Les interactions entre les éléments se traduisent par des relations entre les classes repères.

c/ Les relations de transfert :

elles concernent les véhicules de l'information et l'information elle-même. Dans l'exemple du sol l'information est liée à l'implication de la biosphère dans les processus pédologiques. Dans ce cas elle revêt un rôle identique à celui qu'elle exerce dans les processus biologiques de régulation des organismes.

Le système sol n'est pas seulement physique, c'est à dire pas uniquement régi par les forces qui s'exercent d'un élément sur un autre. Il est également biologique dans la mesure où la biosphère participe de son évolution. C'est un lieu d'échanges : il y a produit échangé entre des unités structurales, entre une source et un puits dirait-on en biologie. On en peut cependant appliquer le principe de l'interaction fonctionnelle et les concepts associés de source-puits-transformation utilisés en biologie sans redéfinir ces notions dans le contexte sol, malgré l'identité topologique (connectivité des sources et des puits) qui existe entre les systèmes pédologiques et les systèmes vivants.

B Systèmes et entropie¹¹

Nous revenons à l'exemple du système sol.

Le sol est un système ouvert qui échange de la matière et de l'énergie avec l'extérieur. Le climat et la végétation contrôlent une partie des flux d'énergie. L'échange de matière est subordonné à l'existence de potentiels notamment de nature gravitaire qui font également intervenir les flux d'énergie. La matière elle-même, quelle soit minérale ou organique, contribue à maintenir les potentiels chimiques nécessaires au maintien de l'état stable.

Dans le cas du système sol, l'entropie peut augmenter ou diminuer. Nous verrons que l'état d'entropie maximale correspond à l'équilibre c'est à dire la probabilité maximale de ses différents états, un sol correspondant à une somme de micro états. Chaque micro état peut-être considéré isolément : c'est le niveau d'échelle auquel opère l'observateur. L'entropie du système sera donc la somme des entropies individuelles.

L'augmentation de l'entropie signifie que l'on va vers l'équilibre (au sens thermodynamique du terme), c'est à dire l'homogénéisation des phases et des concentrations, au profit du plus grand désordre. En revanche la diminution de l'entropie ne peut se faire qu'aux dépens d'une augmentation d'entropie encore plus importante dans le milieu extérieur: le rôle de l'homme à cet égard est capital.

En effet, l'homme effectue de nombreux apports (intrants) sous différentes formes :

- en premier lieu de matière :
 - (i) organique, il s'agit de fumier, d'engrais verts ou de résidus de récoltes...
 - (ii) minérale (sous forme d'engrais ou d'amendements).
- en deuxième lieu de l'énergie :
 - (i) liée à l'apport de matière
 - (ii) sous forme de travail (façons aratoires, mise en culture, drainage, gestion de l'espace...).

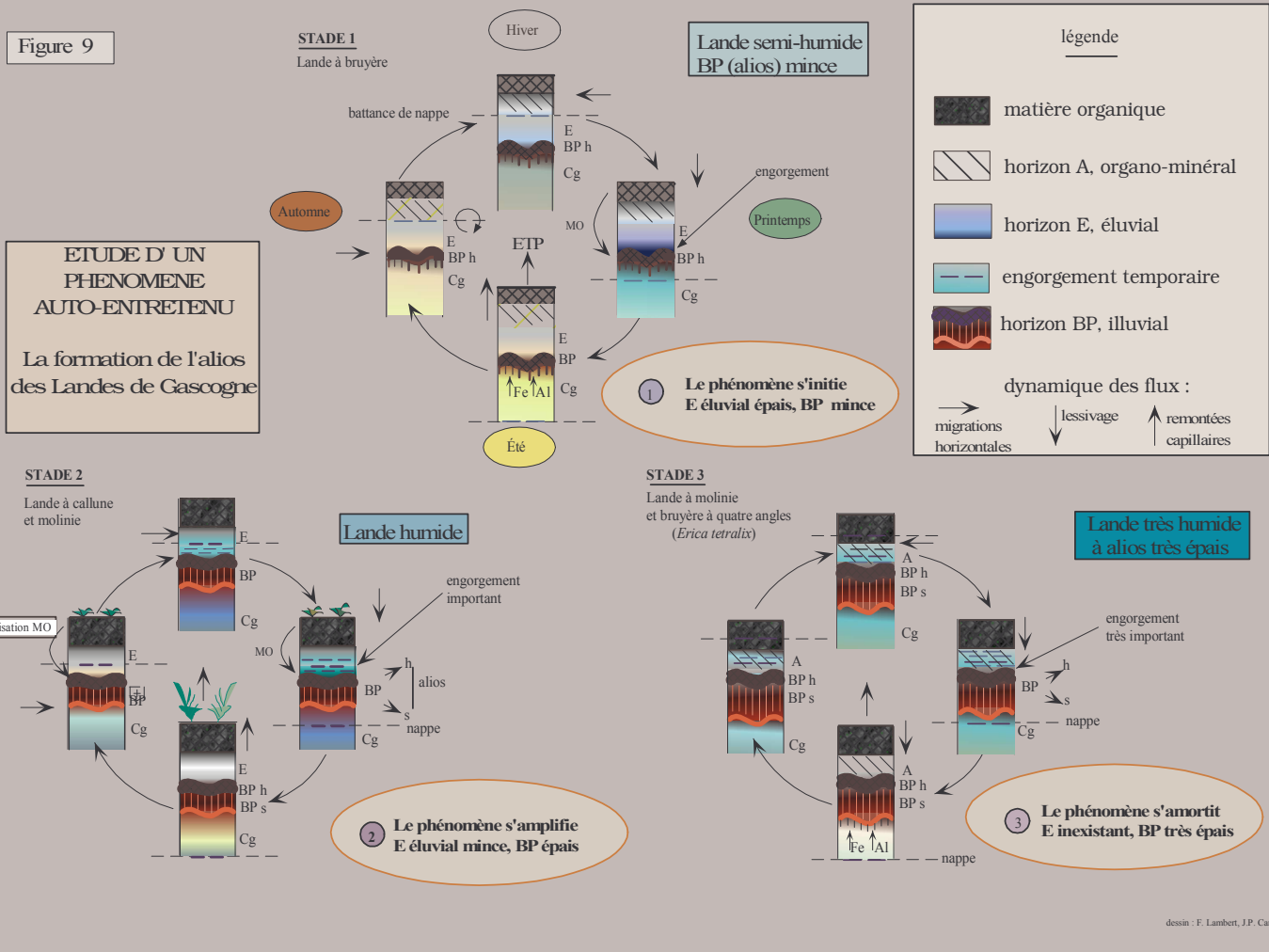
Dans une certaine mesure l'homme limite l'inéluctable augmentation d'entropie spontanée du sol livré à son évolution naturelle. Cependant celle-ci se fait aux dépens d'une augmentation d'entropie encore plus grande du milieu extérieur (consommation de l'énergie alors transformée en chaleur dans le processus industriel de production..)

A chaque étape de la pédogenèse, dans le processus de différenciation en horizons, se créent des systèmes de plus en plus ordonnés. Il se crée en effet localement un ordre correspondant à une diminution d'entropie. Sa manifestation est permanente. Quand le système maintient ou modifie sa structure dans le sens d'une plus grande complexité, tout se passe comme si de l'ordre était dérobé au milieu extérieur. C'est la notion de néguentropie concept défini par le physicien américain d'origine française Léon Brillouin (fils du physicien Marcel Brillouin).

¹¹ Le terme *entropie* a été forgé en 1865 par le physicien allemand Clausius à partir de la racine grecque *tropi* qui évoque l'idée de transformation ou de retour en arrière. Il introduisit cette grandeur afin de caractériser mathématiquement l'irréversibilité de processus physiques tels qu'une transformation de travail en chaleur. Depuis cette époque, tel le dieu grec Protée, le concept d'entropie n'a cessé de se métamorphoser [...] Nous verrons en particulier que la notion de *quantité d'information*, utile en théorie de la communication ou en informatique, est étroitement apparentée à celle d'entropie.

Roger Balian, *Les états de la matière*, p205, Université de tous les savoirs, Odile Jacob, 2002

Figure 9



dessin : F. Lambert, J.P. Camuzard

Entre ces différents états différenciés, relatifs à un certain niveau de pédogenèse, règne une relative stabilité : le système sol est dans un état métastable permettant une caractérisation typologique. Le pédologue peut lui donner un nom dans la mesure où différents paramètres de caractérisation tels que les horizons de référence ou les solums diagnostiques sont observables. Une évolution de ces horizons de référence peut intervenir en fonction des contraintes de milieu.

En effet l'état du sol permettant sa caractérisation typologique est incertain. Sa structure va être modifiée et ceci à différents niveaux d'échelle (ceux des agrégats, des horizons, des solums, des catenas, des paysages etc). Des paramètres scientifiquement connus (ou pas) peuvent intervenir pour modifier soudainement l'ordre des choses.

Nous en analysons les conséquences dans le processus de podzolisation par exemple dont les causes complexes et récursives amènent à considérer, dans le cas présenté en exemple dans la figure ci-contre, la formation de l'aliOS dans les Landes de Gascogne, comme un phénomène autoentretenu (Camuzard, 2000). Le système accroissant sensiblement sa complexité au cours du temps, du fait de l'existence de conditions récursives (causalité circulaire), liées au milieu et à l'expression de son incertitude, il apparaît un risque, écologique, de modification irréversible des systèmes de mise en valeur.

C. Expression de l'incertitude du milieu et risques

a/ Etat stationnaire et incertitude du milieu

Il y a incertitude dès lors que, sous l'influence de nouvelles contraintes, les systèmes emboîtés qui constituent notre environnement quittent l'état stationnaire pour atteindre un état transitoire dont les paramètres sont appréciés par l'homme comme étant aléatoires.

Autrement dit l'incertitude du milieu est liée à celle des risques (que J.-P. Dupuy qualifie d'aléatoires ou conjecturés, Dupuy 2002).

Quelle que soit l'activité que l'on mène ou la chose que l'on considère, l'état stationnaire constitue une référence et une excellente occasion de pouvoir définir les conditions initiales d'un système. L'état stationnaire qu'il soit écologique, social, économique est le fait des systèmes ouverts pouvant dissiper vers l'extérieur la totalité de l'entropie produite. Le système perpétue sa structure à cette condition, c'est à dire celle d'une variation d'entropie qui reste nulle.

Or l'état stationnaire est rarement le fait des écosystèmes parce qu'ils impliquent le vivant où se produit en permanence la différenciation de structures ou d'organismes nouveaux. Cette différenciation requiert qu'ils dissipent davantage d'entropie qu'ils n'en produisent afin d'accéder à des niveaux supérieurs d'organisation.

Ce qui est vrai à l'échelle du vivant l'est également à celui des structures sociales ou économiques : l'état stationnaire réclame une grande perméabilité des systèmes extérieurs à celui que l'on considère c'est-à-dire le milieu.

L'incertitude du milieu est l'expression de sa complexité. L'état stationnaire (du système) aura d'autant plus de difficultés à s'établir que l'incertitude du milieu (par rapport au système) est grande. Le système doit remanier sa structure. En cas d'échec une autre structure prend naissance et c'est ce que l'on appelle une catastrophe ou bifurcation.

b/ Incertitude du milieu et adaptation

Les systèmes étant rarement stationnaires, il appartient à l'ingénieur et particulièrement celui qui œuvre dans le domaine de l'environnement de maîtriser les différentes modalités naturelles ou culturelles de l'adaptation des systèmes à l'émergence de nouvelles contraintes.

Toute adaptation aux contraintes du milieu obéit aux quatre termes de l'équation suivante :

Le premier terme est un postulat : celui que les **systèmes remanient leur structure interne**. Si l'incertitude du milieu augmente le système remanie sa structure selon trois modalités différentes :

1. **accroissement de la complexité du système**, avec création de structures nouvelles, (exemple l'adaptation des animaux aux conditions du milieu) ; autre exemple les principes régissant les rapports entre les hommes ;
2. **amélioration de la faculté d'anticipation du système**, par rapport au phénomène susceptible de le perturber : une pierre n'anticipe rien pas même les phénomènes

climatiques qui vont provoquer sa désagrégation ; une plante perdra ses feuilles en cas de sécheresse prolongée ou mettra à fruit si les conditions du milieu menacent la perpétuation de son espèce ;

3. ***inhibition de l'effet que le système exerce sur le milieu*** : c'est l'exemple classique de la dissimulation des animaux, mais qui pourrait fort bien s'appliquer aux sociétés humaines, exemple des opérations d'ingénierie écologique. Nous définissons *la sensibilité du milieu* par rapport au système : le mouton aura plus d'influence sur le milieu « prairie » que l'abeille qui butine la fleur de ravenelle, à moins que le mouton inhibe son effet en refusant de pâturer !

Il apparaît qu'incertitude du milieu et complexité du système ne sont pas corrélatifs. En revanche incertitude et sensibilité du milieu le sont : un milieu complexe est sensible. C'est particulièrement le cas dans le "domaine de l'écologie" où la fragilité du vivant est sans cesse confrontée à la convoitise des prédateurs, voire à la résistance du milieu physique et à celle des sociétés.

c/ Les manifestations de l'incertitude du milieu

1. *Incertitude par chute brutale de résilience* ou franchissement du seuil de résilience lorsque les conditions de retour à l'état initial du système sont franchies : cas de la podzolisation des sols forestiers suite à l'enrésinement ou encore celui de la désertification suite à une mauvaise gestion des ressources en eau, voire celui de la pollution des aquifères.

Du point de vue anthropocentrique et dans ce cas particulier, l'incertitude du milieu est fonction de la connaissance des seuils de résilience mais aussi d'une réelle volonté politique de résoudre le problème, voire d'une capacité de l'homme à prendre conscience de la réalité des phénomènes.

2. *Incertitude par induction de systèmes auto-entretenus* (cf. boucles de rétroactions positives Dupuy, 2002) : nous avons évoqué ci-dessus, à ce sujet, le cas de la formation de l'alias des Landes de Gascogne, mais le meilleur exemple serait certainement celui du réchauffement climatique où, de plus, les effets de l'industrialisation se superposent à ceux de la nature. Le risque est évidemment celui de la perte relative de contrôle du système et son "emballement".

Du point de vue anthropocentrique l'incertitude du milieu est fonction de la capacité de l'homme à anticiper. Là encore le risque est subordonné à la capacité de l'homme à prendre conscience des catastrophes toujours possibles (Dupuy, 2002).

3. *Incertitude épistémique*. Les systèmes à risques pour lesquels il est logiquement impossible de prévoir les "ruptures" : nous sommes dans une logique qui échappe à l'humain du moins qui introduit le comportement de l'homme face à l'incertain.

Du point de vue anthropocentrique, l'incertitude du milieu est traduite en degré de conviction.

Cette revue des différents types d'incertitudes du milieu et notamment le dernier, traduit bien le fait que l'ingénieur doit dépasser le domaine du technique pour atteindre celui du politique, celui des choix de société :

"D'après nous, la tâche des experts est de transformer l'évaluation d'incertitudes scientifiques en des estimations fonctionnelles de la qualité des données utiles à la mise en œuvre de politiques." (Ravetz, 1992).

Conclusion de la première partie

Nourrie de la réflexion épistémologique initiée par Gaston Bachelard, Alexandre Koyré et Georges Canguilhem, la systémique n'a guère constitué une discipline (ce qui eut été paradoxal) ; elle n'est pas non plus d'un usage universel en sciences humaines et sociales.

Elle reste cependant un outil intéressant pour appréhender le monde et sa complexité, en dépit et au delà du clivage cartésien institué entre sujet et objet.

« La division entre le sujet et l'objet, avec la position de surplomb qu'elle impliquait, laissait entendre que les sciences pourraient parvenir à une situation de clôture de la connaissance dans laquelle le sujet pourrait saturer l'objet par l'enveloppe de son savoir »¹²

Bruno Latour avec le principe d'Irréductions (1984) met en avant l'idée de multiples traductions entre les registres, matériels et idéels, de la réalité.

Si les systèmes se définissent entre autre par leurs frontières, il n'en reste pas moins que celles-ci ne sont pas toujours matérielles et la systémique permet d'aborder des champs où la matérialité s'imbrique étroitement dans l'irréel, le sensible, le perçu, le senti. Canguilhem disait en 1943, dans sa thèse, que la frontière entre rationnel et irrationnel était fragile.

Marcher vers des territoires immatériels, hors des normes et des lois physiques d'ailleurs fortement remises en cause (*cf.* Ilya Prigogine et la théorie des structures dissipatives) est certainement l'un des moyens féconds d'atteindre, au cœur de la complexité du monde, ce qui constitue l'âme des choses et l'essence de notre conscience.

La théorie des systèmes tentera de rendre compte de l'imbrication des flux d'informations, de matières et d'énergie, de leurs circuits et de leurs régulations en distinguant information circulante et information-structure (ADN). La théorie des systèmes réunit par leur caractère de circuit les flux d'énergie, de matière et d'information. [...]. Ce qui rapproche la théorie des systèmes de la cybernétique, c'est le rôle structurant donné à la finalité d'un système, organisant le fonctionnement interne en fonction de son objectif. Cette finalité peut être individuelle (biologique) ou collective (sociale), ce qui change beaucoup de choses mais pas la nécessité d'assurer la collecte et la distribution de l'énergie et des matières, ainsi que de réguler l'ensemble grâce aux informations disponibles.

Jean Zin, relevé sur site internet

Jean-Pierre Camuzard
Ouireham
Août 2006

¹² Extrait du dictionnaire de géographie, article épistémologie, auteur François Dosse