

CHAPITRE I

MODELES ET SYSTEMES

Modéliser un phénomène

L'approche classique pour comprendre les phénomènes est scientifique. Cette compréhension revient à définir, dans un langage particulier très précis et très expressif, un modèle d'explicitation du phénomène, puis à utiliser ce modèle pour produire des résultats, pour faire des prédictions. Le chemin actuellement utilisé dans la plupart des sciences revient à développer un modèle équationnel du phénomène puis à réaliser un traitement numérique sur machine. Les résultats du traitement numérique sont les effets attendus à propos du déroulement du phénomène. Nous allons proposer une autre voie pour traiter des phénomènes d'un type particulier, les phénomènes caractérisés comme complexes, que l'approche mathématique ne permet pas de bien appréhender.

Les phénomènes

Un phénomène est quelque chose que l'homme peut observer dans son environnement avec ou sans l'usage de moyens particuliers de prise d'information, c'est-à-dire des appareils, comme le déplacement d'un nuage,

la fuite d'une proie, la transformation chimique d'un produit, la constitution d'un organisme ... Les phénomènes sont considérés comme donnant lieu à des effets spatiaux par rapport à l'arrière-plan où ils se déroulent et à des transformations plus ou moins rapides dans le temps. Ce sont des phénomènes qui existent donc dans un espace spatio-temporel.

Un *phénomène* sera, plus précisément, la saisie par un observateur quelconque d'une forme spatiale et d'une transformation dans la durée :

- il y a spatialisation du phénomène, qui existe effectivement de manière localisée dans l'espace physique. Par exemple, le fonctionnement d'une raffinerie est un phénomène occupant un volume, un son perçu est une vibration localisée (avec dissipation) d'un volume d'air ambiant. Tout phénomène est ainsi doté d'une forme délimitée qui est son existence spatiale dans l'univers.
- il y a une durée du déroulement du phénomène, qui peut être très courte ou très longue, comme par exemple l'instant presque ponctuel de la collision d'un photon avec un électron, ou la durée très longue, comme le déploiement de la vie sur la planète Terre. Tout phénomène a donc une durée finie.

Les notions d'infini et d'instant sans durée sont donc des concepts qui ne s'appliquent pas à cette définition des phénomènes. Un phénomène est un processus qui se déroule dans une partie finie de l'espace et qui dure un certain temps. Ce qui n'est pas un phénomène, dans ce que l'homme peut observer, sera appelé un *effet*, c'est-à-dire un caractère instantané ou a-temporel d'un certain phénomène, comme la couleur d'un arbre à une certaine saison, ou l'intensité d'un son à un instant donné de sa diffusion. Une autre façon de considérer des choses qui ne peuvent être des phénomènes, est de les catégoriser comme infinies ou sans durée. La philosophie, et les mathématiques, permettent la conception de tels caractères. Un aspect est un attribut caractérisant une classe de phénomènes. Tous les phénomènes de la même classe sont distingués entre eux par les valeurs de leurs attributs. Les concepts de généralisation et d'abstraction permettant de définir des genres et des représentants d'un même genre, ou si l'on veut pour parler en termes modernes, des classes et leurs instances, sont les caractères fondamentaux de la capacité cognitive humaine.

Remarquons bien que nous avons précisé que les caractères *permettent* de distinguer les phénomènes mais en les *identifient* pas. Il est en effet assez

courant, sinon très courant aujourd'hui, de confondre un phénomène avec ses seuls caractères, c'est-à-dire de confondre la transformation d'une forme particulière distinguée dans l'espace et appréhendée pendant une durée finie, avec ce qui la caractérise. Un phénomène est une chose du monde, qui existe en dehors de toute observation et en-dehors de sa connaissance par nous humains et qui a à voir avec le monde dans son entier. Il nous est toujours difficile de définir, de manière nécessaire et suffisante un phénomène par un ensemble de caractères : il nous est difficile de créer une description absolument équivalente au phénomène à l'aide de caractères. Nous savons définir des signes indiquant le phénomène, signes qui renvoient au phénomène par une interprétation [Peirce ed. 1984], mais le phénomène est plus que l'ensemble des signes que nous énonçons à son propos, il est d'un autre genre.

Cette façon de définir un phénomène par ses seuls caractères, en considérant qu'il est strictement équivalent aux signes qui le décrivent, s'appelle une *réduction*. L'attitude qui consiste à procéder systématiquement de cette manière est le *réductionnisme*. Un phénomène reste un événement singulier attaché à la généralité du monde, quel qu'il soit, détaché abstraitement *par un observateur* de l'ensemble de tous les événements constituant l'univers en mouvement, c'est-à-dire considéré à part de tout le reste. Ce détachement est pertinent ou ne l'est pas, et il revient toujours à la possibilité que se fixe la science de pouvoir distinguer des phénomènes de leur arrière-plan. Notons que l'axiome du choix utilisé par les mathématiciens, axiome dont on ne peut se passer pour fonder une logique consistante quelconque, permet de considérer à part de tous les autres, un élément quelconque pris dans un ensemble quelconque.

Modèles

On dira que l'on *modélise* un phénomène si on peut lui associer un système formel permettant de le décrire, avec plus ou moins de finesse, pendant des instants de sa durée d'évolution :

- on définit la notion *d'état*, qui exprime les caractères du phénomène à tout instant t donné, à un certain niveau de description. Cet état est représenté par différentes entités, comme des variables, des équations, des structures de données, des objets, des processus ...

- on définit des règles de changement d'état, permettant de représenter le changement des caractères de l'instant t à un instant suivant,
- on décrit l'évolution du phénomène comme une succession rationnelle de changement d'états.

On dispose donc, pour décrire les phénomènes, de *systèmes formels*. Ces systèmes sont les outils élaborés par la science. Ils sont ce qui permet, par le langage scientifique, de procéder à la représentation du déroulement des phénomènes, à partir des caractères jugés nécessaires pour définir leurs déroulements. Les mathématiques présentent un langage de description extraordinairement puissant pour modéliser les phénomènes, parce qu'elles permettent d'user de la notion de preuve, de consistance et de valeurs calculées. Il s'agit de modèles prédictifs, en ce sens qu'ils permettent de représenter des états à un instant quelconque du temps.

On a modélisé un phénomène si l'état courant et les changements d'états successifs sont adéquats, c'est-à-dire correspondent bien, avec le phénomène réel que l'on modélise. Toute la difficulté réside évidemment dans la prise en compte et la représentation des bons caractères du phénomène, pour élaborer le bon modèle : c'est la difficulté de la démarche scientifique.

Modèles discrets

La façon la plus simple de décrire un phénomène est de le modéliser de la manière suivante [Thom 1968] :

1. on associe à chaque état du phénomène un système logique A_t , c'est-à-dire un ensemble de prédicats et de clauses constituant la description, à un instant t , de l'état exact du phénomène,
2. on passe de l'état A_t à l'état suivant A_{t+1} par une déduction, le système de prédicats et de clauses permettant automatiquement d'obtenir l'état suivant de manière consistante.

On a ainsi une description du phénomène dans les termes d'une succession logique d'états à des instants successifs du temps. Remarquons bien qu'entre deux instants successifs, le phénomène n'est pas appréhendé, c'est-à-dire n'existe pas dans le modèle. Il est donc saisi par instants ponctuels, ces instants étant repérés par les nombres entiers de Z (entiers naturels négatifs

et positifs). On dit que la description est *discrète*, ce qui est la caractéristique de l'ensemble Z . Ces instants peuvent correspondre à des états très proches, et on parle alors d'un pas de temps très fin, ou bien à des états éloignés dans la durée, et le pas de temps est alors dit grossier. Cette description est donc dépendante de la signification que l'on donne à t , le paramètre temporel.

On peut donc représenter le phénomène par une équation générale :

$X_0 = A_0$, la condition initiale

$X_{t+1} = g(X_t)$, l'incrémentaire pour tout entier t négatif ou positif.

Il y a les conditions initiales et puis la règle d'évolution, fixée par la fonction g , qui décrit l'évolution du phénomène dans les instants du temps. L'évolution du phénomène se décrit donc bien par les valeurs de la fonction $g(X)$. Remarquons que cette description correspond tout à fait à l'évolution d'un programme contrôlé par des boucles, avec une incrémentaire de t de la valeur 1 à chaque pas.

Modèles équationnels

Les physiciens, et à leur suite beaucoup d'autres scientifiques, utilisent systématiquement ce genre de modèle, mais en portant la notion d'état dans le continu, avec des valeurs de t continues, ou dans un espace d'opérateurs, avec une équation non linéaire qui représente alors l'évolution des caractères du phénomène. Dans ce cas, t prend ses valeurs dans l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels. On sait que cet ensemble se caractérise par le fait qu'il y a toujours un nombre entre deux nombres quelconques aussi proches qu'on le veut. L'avantage n'est pas du tout d'avoir plus d'instant temporels (Z est infini et donc représente beaucoup d'instant !), mais de pouvoir considérer les dérivées et les intégrales des fonctions utilisées dans \mathbb{R} . Cette représentation semble donc beaucoup plus riche que la description discrète.

Le système qui décrit le phénomène, à l'aide d'équations, a en général la forme suivante, avec des conditions initiales et des équations où l'évolution de chaque variable est exprimée par une dérivée première par rapport au temps :

$$X_0=A_0, X_1=A_1, X_2=A_2, \dots, X_N=A_N$$

$$dX_0/dt = f_0 (X_0, X_1, X_2, \dots, X_N)$$

$$dX_1/dt = f_1 (X_0, X_1, X_2, \dots, X_N)$$

...

$$dX_N/dt = f_N (X_0, X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Systeme equationnel general

Il s'agit d'un systeme d'equations differentielles dans lequel les derivees par rapport au temps sont du premier ordre [Von Bertalanffy 1973]. Les equations peuvent etre simples, facilement integrables mais, pour correspondre a des phenomenes reels, elles sont generalement une forme compliquee : les fonctions $f_i (X_0, X_1, X_2, \dots, X_N)$ ne sont pas lineaires et font intervenir, a differents ordres, des produits des variables. Parfois, ces equations peuvent se simplifier astucieusement pour etre integrees, mais dans ce cas, elles ne representent que des phenomenes tres simples, des phenomenes d'ecole.

Remarquons que ces equations ont une importance considerable en science. Elles permettent de représenter la plupart des phenomenes physiques a une certaine echelle et avec un certain degre d'adequation. Elles permettent, en definissant des caracteres observables, de definir des variables significatives et de prendre en compte leurs comportements independants ou lies. Elles permettent d'annoncer des lois comportementales en sociologie, biologie, ecologie, physique, chimie ... On se reportera a l'ouvrage de von Bertalanffy pour une approche de la science des systemes fondee sur des modeles equationnels.

L'importance et la diversite des domaines d'application de ces equations a une contrepartie : on est souvent enclin a partir de certaines equations, derivees d'equations classiques et obtenues par des recherches formelles, pour determiner le phenomene. On opere alors a partir du principe que les equations peuvent expliquer tout ce qui est a connaitre, qu'il suffit de trouver les bonnes et que meme, en trouvant certaines mathematiquement interessantes et originales, on se donne des idees sur le phenomene.

Dans le système équationnel général, si on ne peut définir analytiquement la solution, les équations seront discrétisées par une méthode numérique adaptée (ceci est le domaine de l'analyse numérique). Les valeurs des variables des équations seront enfin calculées sur machine par calcul matriciel ou par des méthodes itératives, point par point (ceci est le domaine du calcul numérique).

Dans ces équations, les variables sont les caractères du phénomène : le phénomène n'est appréhendé *que* par ses caractères. On peut représenter les relations entre les caractères par des produits, des compositions algébriques fines. On s'intéresse aux situations de changement de trajectoire des variables, aux points où il y a changement de comportement, d'équilibre entre les variables. Notons que ce sont des modèles typiquement prédictifs, car on peut, à partir de leur solution, prédire l'état du phénomène représenté (l'état des variables qui le caractérisent) à tout instant du temps (continu et discret, positif ou négatif), à partir de la seule connaissance de l'état initial et des équations d'évolution.

Un exemple

Donnons un exemple. On nomme X , Y , Z le *nombre* de proies et de prédateurs d'un certain écosystème. X est une proie pour Y et Y est une proie pour Z . Il y a donc trois populations en interrelation. On approche donc le phénomène dans sa globalité et le caractère minimal est le nombre d'individus des populations. C'est la variation des nombres d'individus que l'on va étudier. On définit l'évolution de ces différentes populations par les dérivées des variables X , Y et Z par rapport au temps. Cette évolution est fonction du taux de reproduction des proies et des prédateurs, du taux de mortalité par âge, du taux de compétition entre les individus d'une population, de l'attraction des proies pour les prédateurs ... Tous ces caractères reviennent à introduire dans les équations $f_i(X, Y, Z, ..)$ des produits des variables, des formes fractionnaires ou des carrés. On obtient ainsi un ensemble d'équations différentielles, non linéaires, comme celles proposées par Lokta-Volterra il y a bien longtemps [Volterra 1931], et qui ne sont pas simples à traiter. Le système présenté ici est celui proposé par Letellier-Aziz-Alaoui [Letellier, Aziz-Alaoui 2001] :

$$\begin{aligned}dX/dt &= A_1 X - B_1 X^2 - w_0 XY / (X + d_0) \\dY/dt &= -A_2 Y + W_1 XY / (X + d_1) - W_2 YZ / (Y + d_2) \\dZ/dt &= C_0 Z^2 - W_3 Z^2 / (Y + d_3)\end{aligned}$$

Le traitement de ce système, avec trois populations en interrelation, prend place dans la théorie du chaos. Le système n'est pas intégrable et son traitement numérique, complexe, révèle des comportements singuliers, c'est-à-dire avec des points de bifurcation dans les évolutions des populations. L'étude fine des voisinages de ces points de bifurcation où la régularité du phénomène est rompue, n'est pas actuellement possible avec ces formulations équationnelles. Les équations sont trop compliquées et le pas de discrétisation est délicat à maîtriser. Ainsi, le cas de n populations en interrelation ($n > 3$) n'est pas envisageable sans réduction forte de l'expressivité du modèle.

En fait, plus les paramètres significatifs du phénomène sont pris en compte et plus les interactions sont représentées, ce qui est le cas du phénomène réel. Mais plus le système différentiel est compliqué et difficile à étudier. Ces équations ne peuvent pas être résolues analytiquement : on ne peut en définir la fonction qui en est solution. On ne peut non plus trouver une approximation satisfaisante de la fonction solution. Il est donc nécessaire de procéder à un traitement numérique approchant la solution point par point, avec des méthodes appropriées. Le malheur est que ces méthodes numériques, lorsque le système différentiel est très compliqué, lissent plus ou moins les trajectoires obtenues. Les points singuliers, les points de bifurcation et leurs voisinages, les changements d'état qui modifient significativement les trajectoires, ne sont alors pas toujours bien repérables. Le modèle devient peu approprié au traitement prédictif et observable du phénomène.

Notons que ces systèmes d'équations sont pourtant appliqués à la prédiction d'un très grand nombre de phénomènes physiques, sociaux et économiques. Ce sont les outils actuels d'aide à la décision.

Modèles pour les phénomènes complexes ?

La puissance de ces modèles équationnels est considérable, car leur expressivité est considérable. Elle a fondé la science au dix-neuvième siècle, et leur étude se poursuit actuellement.

Malheureusement, beaucoup des phénomènes qui sont étudiés actuellement ne peuvent pas se ramener à la forme du système équationnel général : ou bien il n'y a pas d'équation simple $f(X)$ permettant de décrire le phénomène dans sa globalité et les cas exploitables sont réducteurs, ou bien cette équation est si compliquée qu'elle ne peut se ramener à une forme calculable, même par discrétisation. Souvent, les caractères de chaque état décrivant le phénomène ne sont pas vraiment indépendants, et de plus, ils peuvent changer dans la durée : ils ne sont pas permanents. Les conditions initiales peuvent aussi être très vagues et l'évolution d'un tel système dépend toujours fortement de ses conditions initiales.

Par exemple, il est impossible de définir finement le phénomène que constitue un organisme vivant de sa naissance jusqu'à sa mort, tel un être humain quelconque, par des équations et un état initial précis. Quelles sont les équations qui régissent le fonctionnement de chaque cellule de l'organisme constituée de molécules en mouvement incessant, ainsi que leurs interactions, et quel est le système d'équation permettant d'en représenter l'agrégation communicante qui fait l'intégrité de cet organisme ? Quel est l'état initial de cet organisme ? La cellule zygote diploïde, alors que l'on ne connaît pas les règles de génération de l'organisme à partir des chromosomes permettant de coder pour les protéines, ou l'organisme achevé, dont on ne connaît pas précisément la provenance ? Comment doit-on simplifier le phénomène tout en en gardant les caractères essentiels ? Et pourtant le vivant est un phénomène qui nous est très commun et dont l'étude semble nécessaire.

Le cas de l'étude des écosystèmes à N populations, comme les forêts ou les océans sont du même genre. Et il en est de même de l'évolution ou même du comportement à court terme des populations humaines de la Terre, des langages et des langues humaines ... Soit on se contente de modèles équationnels approchés ou même réduits par rapport au phénomène, soit on cherche une autre piste de représentation.

Une toute autre modélisation : les modèles de traitement effectif

Pour représenter de tels phénomènes sans en réduire trop la représentation, il va être nécessaire de conserver leur complexité intrinsèque, dans le modèle lui-même. Il ne s'agira donc plus d'un modèle écrit équationnellement et dont l'écriture représente les caractères, avec un traitement numérique détaché, à part, mais d'un modèle *d'exécution*, de *fonctionnement similaire* à celui du phénomène étudié. On exprime la complexité du phénomène, de ses relations, de ses différentes échelles, dans le déroulement temporel du modèle, dans l'exécution de son fonctionnement. Ce n'est plus, et plus du tout, une approche mathématique, mais strictement calculable.

On est ainsi ramenés à définir un état par un certain nombre de caractères de type évolutifs, à une certaine échelle *qui n'est pas l'échelle minimale des éléments du phénomène*. On utilise la notion de mouvement, de changement, d'évolution dans les caractères du phénomène pour définir les éléments de base du modèle calculable. Le phénomène étant complexe, on sait que ces éléments seront insuffisants pour le décrire entièrement, mais en explicitant leurs interrelations et leurs règles d'évolution propres les plus probables, on exprimera la dynamique de fonctionnement du phénomène. On précise l'évolution des éléments de base du modèle, ce qui est différent d'un simple changement d'état séquentiel, à l'aide de lois d'évolution complexes et surtout systématiquement *locales*. Dans les modèles équationnels, les variables sont des valeurs générales. Ici, les éléments de base sont des caractères évolutifs localisés dans l'espace.

Par exemple, pour représenter un système proie - prédateurs, il sera nécessaire de représenter des groupes d'individus de taille variable, leurs évolutions par agrégation ou séparation pour représenter, finalement, par leur ensemble, les populations. Et les interactions ne seront pas ramenées à des produits de variables mais à des confrontations effectives entre entités. Ces confrontations seront également représentées par des entités d'un genre particulier. Le modèle permet d'exprimer les entités physiques effectives du phénomène et aussi leurs relations, communications, comportement, sous la forme d'autres entités. La limitation des variables, et de leurs relations, qui est la faiblesse des modèles équationnels, n'existe pas dans le modèle calculable. L'échelle est variable dans le modèle, par le dimensionnement variable des entités (la taille évolutive des groupes).

On a ainsi modélisé le phénomène à une certaine échelle qui permet sa représentation en conformité avec le phénomène conçu globalement. On est passé dans le domaine de la modélisation cognitive et comportementale des phénomènes.

Cette modélisation doit permettre d'exhiber des caractères exploitables pour la connaissance du phénomène tel il nous apparaît à nous humains et tel il est lui-même, à son échelle d'existence. René Thom a très souvent critiqué la biologie qui s'engageait dans la voie moléculaire, dans la voie biochimique, car l'échelle d'appréciation du phénomène vivant lui semblait alors s'éloigner et devenir trop petite pour produire des modèles de connaissance clairs pour notre appréciation des choses. Cela semble exact, car une théorie des formes, des formes comportementales du vivant, générée à partir du niveau moléculaire est extraordinairement complexe à établir et n'a pas peut-être pas grand sens. Or le vivant n'est que forme comportementale en mouvement. Rappelons que le niveau moléculaire est juste au-dessus du niveau atomique, où la notion de forme n'existe plus.

Algorithme de modélisation

On représente cette modélisation calculable par un algorithme général avec les quatre étapes suivantes :

1. définition d'un ensemble initial d'éléments de base générateur des mouvements des caractères du phénomène,
2. définition des règles de communication et de synchronisation entre les éléments de base exprimant notamment l'évolution temporelle,
3. mise en mouvement des éléments de base,
4. observation de ces mouvements.

Cette modélisation, qui se distingue nettement de la précédente, comprend une conception des éléments caractéristiques du phénomène et un algorithme. Il s'agit d'une approche typiquement calculable et même informatique. En modélisant les phénomènes complexes de cette façon, avec des entités cohérentes avec le phénomène (des entités qui seront mises en mouvement comme le phénomène est lui-même mouvement) et exprimant, par leur comportement, sa dynamique, on s'est placé dans le domaine de la

simulation informatique des phénomènes *complexes au niveau organisationnel*.

Précisons la notion de niveau des entités de base de cette modélisation des phénomènes complexes. Ces modèles seront fondés sur des entités conceptuelles d'un niveau qui doit exprimer le fonctionnement et l'évolution des entités élémentaires du phénomène dans leur aspect relationnel. Le fonctionnement de ces entités locales doit rester cohérent, compatible, avec le niveau global du phénomène. En fait, la définition des bons éléments de base est doublement complexe :

- elle doit être fondée sur les fonctionnalités locales pertinentes qu'assure le phénomène par son existence. Elle doit exprimer les mouvements comportementaux d'éléments de base ou de groupes d'éléments de base du phénomène. Ces éléments sont donc caractéristiques de la dynamique du phénomène. La notion de variable semble trop statique et étroite pour bien correspondre au déploiement du phénomène complexe, qui est systématiquement dynamique et interactif dans ses parties. Une variable n'est en fin de compte qu'une prise de valeur décrivant une quantité. La façon dont la variable prend et change de valeur n'est pas compris dans le prix de la variable. Ce changement est un processus et c'est lui qui en fait importe, autant que la valeur prise.
- elle doit utiliser des concepts dynamiques globaux, qui sont typiques du déploiement du phénomène, et des équations, fondées sur des variables bien définies, avec leurs opérateurs, ne semblent pas bien adaptées à la représentation du phénomène aux deux échelles, locales et globale, car trop rigides une fois que posées. Une équation est une forme langagière, ce n'est pas un acte de parole.

Nous préciserons par la suite, et très précisément, les moyens de réaliser ces entités avec des agents logiciels légers.

Il s'agit donc de concevoir des modèles qui soient à la fois bien représentatifs du phénomène, c'est-à-dire qui le décrivent avec justesse et précision dans son déploiement, et qui soient structurellement cohérents avec le phénomène, c'est-à-dire dont le déploiement calculable corresponde au déploiement spatio-temporel du phénomène lui-même. Cette approche est nouvelle, car la science a très longtemps eu l'habitude de décrire les phénomènes avec des équations dont la forme et l'écriture élégante, malgré la puissance d'expression considérable, n'avaient rien à voir avec le

phénomène lui-même mais en étaient le signe au sens sémiotique du terme, le signe considéré comme rendant le phénomène compréhensible dans son comportement. Le verbe, sous la forme contrainte du discours mathématique, exprimait *toutes* les choses du monde. L'expression la plus radicale de cette approche a correspondu aux travaux et surtout à l'esprit de l'école de Vienne, avec L. Wittgenstein du *Tractatus Logico-philosophicus* [Wittgenstein 1922]. Tout devait alors se ramener à un discours logique, strictement rationnel, fondé sur des axiomes et des assertions valides déduites sans ambiguïtés, discours qui seul permettait d'expliquer r clairement ce qui avait à l'être ! Une civilisation fondée sur le langage ne pouvait pas prendre, à un certain moment de son histoire, cette voie radicale. L'auteur du *Tractatus* a lui-même critiqué fortement et quitté cette voie [Wittgenstein "Investigations philosophiques" 1949]. Mais il existe encore de nombreux émules de ce radicalisme qui semblent n'avoir lu de Wittgenstein que le *Tractatus* et qui semblent ne connaître aucun philosophe phénoménologue du vingtième siècle ...

Les difficultés sont survenues dans la seconde moitié du vingtième siècle, avec la prise en compte de la complexité définitive de certains phénomènes, rétifs à une description précise par des outils formels. La mécanique des systèmes particuliers a ouvert la voie de la complexité avec la notion de système au comportement instable par nature, ainsi que la physique quantique, avec l'abandon de la notion de trajectoire. La théorie du chaos a montré l'extraordinaire complexité et la maîtrise très délicate de phénomènes très courants. Et puis, aujourd'hui, l'informatique vient rompre définitivement le charme des explications équationnelles, en proposant la réalisation et le développement de systèmes complexes virtuels.

On peut, avec les entités informatiques actuelles, s'intéresser à des modèles dont l'expression n'est plus seulement langagière, c'est-à-dire n'est plus simplement équationnelle et de la nature du signe précisant une existentialité, mais dynamique et calculable par des processus informatiques communicants et auto-générateurs.

Ces processus sont capables de produire des formes organisationnelles valant pour l'explication comportementale du phénomène complexe étudié. C'est une nouvelle sémiotique.

Il reste à les représenter ces formes organisationnelles, pour les observer et les analyser, et c'est cela le champ de recherche de la nouvelle intelligence artificielle. Il ne s'agit plus de décrire un certain phénomène complexe dans un langage formel, mais de réaliser et faire se comporter un système informatique au plus près du déploiement du phénomène, en explicitant finement tous les niveaux de complexité organisationnelle mêlés. La complexité ne se décrit pas par des signes, elle s'exprime de manière calculable, sous une forme intelligible et relativement contrôlée, en exhibant certains de ses multiples aspects pour les observateurs.

Définitions de la complexité

Les modèles complexes sont une nouvelle forme de connaissance, dynamique, auto-génératrice, un peu similaire à de la génération artificielle d'organismes pour étudier leur comportement. Cette connaissance nécessitera de s'intéresser à nouveau à ce que signifie connaître, savoir et comprendre, de faire le point à propos de l'étrange vénération kantienne ou aristotélicienne encore si pratiquée, de retourner au questionnement sur les sources, très négligé par les scientifiques, de l'être de la connaissance : qu'est-ce que l'appréhension d'un phénomène complexe et qu'est-ce que le connaître pour nous, humains ?

Tentons de définir les deux catégories de la complexité que nous avons abordées : le phénomène complexe et le modèle complexe du phénomène complexe

Phénomène complexe

Un phénomène complexe est la considération d'une forme identifiée se déployant dans l'espace-temps, ayant une permanence existentielle, constituée d'un ensemble d'éléments en interactions, ces éléments changeant d'état ainsi que leurs interactions, cet ensemble étant tel que tout accès direct, par un observateur quelconque, à au moins un élément peut perturber transitivement l'ensemble de tous les éléments de façon non prédictible exactement.

Un phénomène complexe existe réellement dans l'espace et le temps, il est identifiable comme un phénomène doté de permanence, et pourtant, il

change organisationnellement sans cesse, il modifie ses composants et leurs relations. Surtout, il n'y a pas indépendance de l'observation par rapport aux éléments constituant le phénomène : l'observation est modificatrice du fonctionnement et n'est jamais neutre. Ce caractère se rapproche du cas de l'observation d'une particule en mécanique quantique avec les relations d'incertitude d'Heisenberg. Nous avons déjà présenté cette particularité des phénomènes complexes [Cardon 2000].

Modèle complexe de phénomène complexe

Un modèle complexe est le correspondant calculable d'un phénomène complexe en vue d'une simulation explicative, dans lequel les éléments de base sont des entités conceptuelles autonomes, calculables sur ordinateur. Ces entités sont actives pour elles-mêmes et forment un ensemble non supervisé présentant une très forte correspondance comportementale avec le déploiement du phénomène. Ces entités agissent à la fois pour leur compte et pour l'intérêt de la cohérence et des fonctionnalités de l'ensemble qu'elles constituent.

Cette définition de la complexité ne fait que reprendre celle proposée par E. Morin [Morin XX] en la plaçant dans le champ informatique. Elle insiste sur la dépendance organique nécessaire entre le tout et les parties pour définir un phénomène complexe. Ce que le fonctionnement du système réalisant le modèle complexe montrera, ce seront les différentes échelles de la complexité organisationnelle en action de réalisation, les différents aspects relationnels et interdépendants des éléments constituant le phénomène en train de se déployer. La complexité est une notion essentiellement active, qui se réalise par une exécution.

Limite des représentations équationnelles

Evidemment, on pourrait penser représenter un phénomène complexe par des équations de trajectoire comme avec le système équationnel général. Il faudrait alors représenter tous les caractères possibles qui peuvent être pris par les éléments du niveau élémentaire ainsi surtout que leurs relations par des produits de paramètres figurant dans des équations différentielles, tous les états possibles au premier niveau agrégatif par d'autres paramètres, tous

les états possibles au niveau de l'agrégation de ces agrégats ... et ainsi de suite, jusqu'à l'agrégation finale constituant le phénomène dans son entier, avec des paramètres d'ordre supérieur. Et il faudrait résoudre un système d'équations différentielles non linéaires où tous les paramètres peuvent varier en même temps, ce qui est impossible mathématiquement. On doit fixer la plupart des paramètres et étudier le phénomène lorsqu'un seul paramètre, ou deux peut-être, sont libres.

Compléter

Représentation par entités informatiques autonomes : vers les systèmes multi-agents massifs

Les éléments de base du modèle complexe ne sont pas décrits par des paramètres et ne sont pas non plus les éléments de base physiques du phénomène. Ce sont des entités conceptuelles ayant un caractère à la fois sémantique et dynamique, dotées de comportements autonomes, évolutifs, reproducteurs, et exprimant essentiellement la *dynamique des changements d'états* de certains agrégats d'entités de base du phénomène sous leurs contraintes diverses. Elles seront conçues à partir des modèles mathématiques, en s'intéressant aux points singuliers et aux changements de comportement des trajectoires des solutions des différentes équations, aux conditions de rupture des régimes réguliers. La connaissance nécessaire à la définition des entités de base du modèle complexe vient de la considération des comportements des éléments du phénomène physique et des résultats de son étude mathématique.

Dans le premier cas, le cas traité essentiellement par des équations, on exprime les choses du monde telles elles sont, systématiquement et on représente l'évolution du phénomène selon un paramètre qui est variable. Dans le second, on exprime les transformations, les ruptures de permanences s'opposant à ce qui est stable, à ce qui tend à ne pas engager de changement dans le comportement du phénomène. Ce sont en fait deux visions du monde différentes, la première étant systématiquement analytique et basée sur la notion que M. Heidegger appelle un *étant*, la seconde se fondant sur le principe darwinien de l'opposition entre des formes qui ne

peuvent que s'opposer ou se renforcer, avec sélection des plus aptes à se maintenir en état d'action. Le premier cas laisse à penser que le système à une raison à être, une finalité qui est révélée dans la résolution des équations qui le décrivent et que l'on a posées d'abord. Dans le second cas, le système complexe fonctionne de la façon dont il fonctionne (tout en restant bien observable) car il ne peut tout simplement pas en être autrement. Dans les deux cas, la définition des variables et des équations ou bien la définition des entités de base avec leurs lois comportementales, font le modèle, et cela n'est jamais simple à modéliser.

Nous nous intéressons donc à des modèles dynamiques fondés sur des entités informatiques qui sont calculées sous forme de processus sur des ordinateurs en grappes. La modélisation dans une optique calculable est le thème majeur de la Nouvelle Intelligence Artificielle. Ces modèles peuvent éventuellement être étudiés au niveau de leur comportement par une approche équationnelle. Cette étude est à faire et devra évidemment l'être. Mais notons bien qu'on ne part pas, pour modéliser le phénomène complexe, d'équations initialement bien écrites, traitées par des méthodes numériques connues et enfin calculées point par point par des routines Fortran disponibles dans les bibliothèques usuelles. On part d'une forme typiquement calculable définissant le modèle computationnel du phénomène, à une certaine échelle qui respecte ses caractères évolutifs locaux *et* son caractère global, pour éventuellement en déduire, par la suite, si l'on veut, une forme équationnelle quant au comportement de ces processus.

La modélisation et la conception de tels systèmes sont actuellement engagées, et particulièrement dans le cadre des systèmes multi-agents massifs. Mais c'est une attitude de rupture épistémologique à l'encontre de la science académique, qui se fonde elle sur des systèmes d'équations de trajectoire et qui considère toujours que tout phénomène du monde, quel qu'il soit, est connaissable en fin de compte comme un ensemble de variables définies dans un certain système d'équation, dans un certain espace mathématique. La complexité des phénomènes signifie que cette approche langagière est insuffisante : il faut, pour l'appréhender, développer des modèles dont le *comportement typiquement dynamique*, parce qu'il est dynamique, parce qu'il s'agit d'un comportement comme l'est le déploiement du phénomène, et parce que les éléments de base expriment localement le comportement interactionnel de certains groupes d'éléments du phénomène, correspond et exprime ce qui nous est connaissable à propos du phénomène

complexe. La complexité n'est pas évacuée du modèle, mais est exprimée, c'est-à-dire mise en action, à l'échelle du computable.

Toute la question est alors l'explicitation de ces nouvelles modélisations, dans la façon de les obtenir, de les calculer sur ordinateurs, dans la façon de les contrôler et enfin dans celle de les valider. Il s'agit probablement d'une nouvelle science, la science des systèmes calculables complexes et décrivant des phénomènes complexes. Mais la création d'une science n'est pas une mince affaire et elle surgit, nécessairement, dans la douleur des crises de certaines autres ... Nous sommes actuellement dans certaines formes bien avancées de crise.

Telle est l'évolution, complexe s'il en est, des affaires scientifiques.

Les systèmes

A partir de la notion de phénomène et de ses représentations par des modèles, on peut définir la notion, plus réduite et plus spécifique, de système. La notion de système est en fait ambiguë. Elle admet trois acceptations bien différentes :

- le système matériel, physique, comme le système solaire,
- l'organisation d'un procédé, comme le système de couverture sociale ou d'assurance maladie,
- les systèmes d'équations modélisant un phénomène.

Dans tous les cas, il y a un caractère spécifique qui permet de parler de système : il s'agit de l'organisation d'un ensemble de choses formée de parties distinctes et qui, par cette organisation, constituent un ensemble identifié.

Les caractères d'un système

Un système est une certaine représentation dans le réel d'un certain phénomène, phénomène modélisable et modélisé. Cette représentation est faite en vue de la compréhension ou de la construction effective du phénomène, en le considérant sous son aspect organisé.

En ce sens, par cet aspect concret, un système réifie, ou si l'on veut réalise, un modèle qui est, lui, une abstraction. Par exemple, le plan de conception et de fonctionnement d'un réacteur d'avion de chasse, avec le calcul de sa logique de fonctionnement, est un modèle mécanique et cybernétique. La construction effective du réacteur en fait un certain système mécanique. La simulation du fonctionnement du réacteur à l'aide d'un programme informatique est un autre système, virtuel, mais produisant réellement des effets : les données calculées et délivrées effectivement à l'utilisateur. D'une

autre manière, l'ensemble des équations de trajectoire de l'ensemble des planètes gravitant autour du soleil constitue un modèle équationnel. Mais l'usage, dans ce cas, permet de parler d'un système d'équations. La considération du phénomène physique du mouvement apparent de ces planètes constitue un système concret, appelé communément système solaire. Et la simulation du mouvement de ces planètes visualisées sur un écran d'ordinateur est le fonctionnement d'un système virtuel produisant des effets réels.

Virtualité

On qualifie un système de virtuel quand ce système existe sous forme d'équations ou de programmes informatiques et qu'il produit des effets réels.

Dans cette définition, nous insistons sur le fait qu'un système même virtuel produit, toujours, des effets réels pour l'observateur. S'il n'y avait pas d'effet réel, le système ne serait pas perceptible et ne pourrait être un objet d'étude scientifique pour un observateur humain. Un effet non réel est un champ sans application. Un système informatique produit des effets multiples, minimaux et formant un ensemble très compliqué, comme des accès de mémoires distribuées, qu'ils ne sont pas effectivement perceptibles. Mais tout effet pourrait l'être, si le programmeur s'intéressait à un effet particulier pour le suivre. La notion de virtualité est une réalité relative.

Réalité

On qualifie un système de réel quand il a sa forme dans le monde réel bien observable.

Il en est ainsi du système solaire, qui est bien réel et observable, ou du système de chauffage d'une maison. Les systèmes réels produisent des effets réels, c'est-à-dire effectivement observables.

Insistons sur un caractère particulier et fondamental quant à la notion de système. Il est nécessaire, pour parler de système, que le phénomène et sa modélisation soient d'une certaine complexité. Par exemple, un point dans le plan ne sera pas un système, mais un caractère ou un effet. Mais un point doté d'une masse et se déplaçant sur un plan incliné sera un système mécanique.

De manière classique, on définit un système comme étant tout à la fois un ensemble autonome en rapport avec son environnement, un ensemble cohérent constitué de sous-systèmes en interactions et enfin un ensemble subissant des modifications plus ou moins profondes mais lui assurant toujours une certaine permanence [Walliser 77].

Système

*C'est un ensemble formé de sous-systèmes,
C'est un ensemble autonome par rapport à son environnement,
C'est un ensemble cohérent de parties,
C'est un ensemble se modifiant pendant son fonctionnement.*

Il s'agit d'une définition très générale, de type à la fois ensembliste et fonctionnelle, dans laquelle le système se caractérise par le fait qu'il est constitué de différentes parties qui interagissent. Nous posons comme complément à cette définition qu'un système doit être soit un modèle soit un ensemble modélisable. Un système réel est, pour être un système, modélisable. Un système virtuel est un modèle ou sa réification calculable.

Ainsi, une cellule biologique est un système car elle est composée de très nombreuses molécules interactives. Tout organisme vivant est un système car formé de très nombreuses cellules. Un carburateur de voiture, une usine, l'économie d'un pays sont des systèmes à d'autres échelles, un plasma ou tout ensemble de particules interactives forment également des systèmes. Un quark, composant ultime d'un neutron, n'est pas considéré comme un système, ni un photon. Par contre, l'observation de ces particules par d'autres particules qui doivent entrer en collision avec elles pour l'observation et la mesure, forment des systèmes quantiques mettant en interaction une particule et son moyen d'observation.

Cette définition d'un système précise les trois caractères qui font de quelque chose d'observable un système : l'autonomie par rapport à l'environnement de l'observation, la composition en différentes parties formées de composants et enfin la plasticité de l'organisation des composants. La manière de préciser les rôles de ces parties et leur mise en œuvre permettra de définir certaines typologies des systèmes.

Mais cette définition ne précise pas comment le système s'est formé, comment il est devenu le système que nous observons et comprenons et elle sous-entend même que le système est le simple résultat de la mise en relation de ses différentes parties. La génération d'un système vivant est un problème étudié en biologie du développement : la formation d'un organisme à partir d'un œuf zygote, c'est-à-dire fécondé. La conception d'un système technologique est un problème de génie des procédés et celui d'un système de production faisant intervenir des opérateurs humains est du domaine de la théorie des organisations. La réalisation d'un système informatique est le domaine du Génie Logiciel.

SYSTEMES OUVERTS ET SYSTEMES FERMES

Il est bien évident qu'il y a plusieurs sortes de systèmes et même plusieurs manières de les appréhender et de les classer. Nous allons nous intéresser essentiellement à des systèmes artificiels qui ont des propriétés semblables aux systèmes vivants. Les systèmes vivants sont, eux, considérés comme adaptatifs au sens intuitif de ce terme. Pour cela, nous allons proposer une catégorisation des systèmes artificiels en deux grandes classes, en nous référant aux travaux de von Bertalanffy [von Bertalanffy op. cité].

Les systèmes fermés

La première catégorie de systèmes que nous pouvons considérer est constituée des systèmes réalisant des actions précises et invariables *sur* leur environnement. Par exemple, le disque dur d'un ordinateur à une fonction précise et réalisée de façon immuable par du stockage de bits selon le système de fichiers : c'est le système chargé de la mémorisation permanente de l'information sous forme binaire bien structurée pour l'accès et la modification. De la même façon, une gare ferroviaire joue un rôle permanent dans l'acheminement des voyageurs et des marchandises : c'est à la fois un bâtiment et l'ensemble des fonctions précises et permanentes de ses différents services qui permettent la gestion de l'entrée et de la sortie du fret et des voyageurs, dans la durée. Un moteur de voiture en est également un exemple, qui est formé de nombreux sous-systèmes à la structure immuable car mécanique ou électrique : un carburateur, un embrayage, le système d'allumage ... En fait, tous les systèmes électro-mécaniques sont de cette catégorie.

Ces exemples illustrent un type de système dont le rôle général et la structure sont permanents, dont la fonction est bien définie et ne change pas. Nous les appellerons des systèmes *fermés*. La notion de fermeture qu'on peut leur attribuer signifie qu'ils sont définis pour jouer un rôle permanent et que leurs interactions avec l'environnement ne modifient pas ce rôle mais, au contraire, le réalisent de manière fixe. Le fonctionnement du système ne modifie ni sa fonction ni son architecture. Son comportement est donc bien prévisible selon ses interactions avec son environnement.

Systeme fermé

C'est un système dont l'architecture est globalement stable, dont le rôle est permanent et défini à la construction, dont le fonctionnement ne modifie ni ce rôle ni son architecture et dont l'état est prévisible à l'avance.

Remarquons bien que la notion de fermeture ne signifie pas l'absence de communication entre le système et son environnement. Elle précise simplement que le système est distinct de son environnement d'usage et qu'il échange avec ce dernier des informations ou de la matière qui sont d'une autre nature que ses propres constituants. Ces constituants seront informés et se mettront en action de manière fonctionnelle, en développant leur rôle. Il y a ainsi dans ces systèmes une entrée et une sortie, mais ce qui entre et sort n'est pas de même nature que ce qui constitue les composants du système.

De tels systèmes réalisent très clairement des *fonctions*, le terme fonction étant entendu au sens d'une relation parfaitement précise entre les états d'un domaine et ceux d'un autre ou encore du même domaine. Ils sont en fait essentiellement construits pour réaliser de telles fonctions. On peut même comprendre leurs rôles comme la réalisation de *la* fonction résultante de la combinaison des fonctions particulières définie par le fonctionnement de leurs différents constituants. En ce sens, leur construction pourra être fondée sur la composition, et la décomposition, des fonctions qu'ils doivent assurer.

Composition d'un système fermé

Un système fermé est formé de composants fonctionnels aux comportements parfaitement définis et fixés et dont la fonctionnalité générale résulte de la composition des fonctions particulières engendrées par ses différents constituants.

On peut dire que le schéma du système, la précision de tous ses composants ainsi que leurs rôles respectifs est suffisant pour comprendre le rôle général du système, pour savoir ce qu'il va faire dans ses différents cas d'usage. Ces systèmes se décrivent donc complètement par leurs fonctionnalités.

Plus particulièrement, en réalisant une certaine fonctionnalité, l'état initial de ces systèmes détermine entièrement l'état final. Leur état final, qui est un état d'équilibre, est atteint par le fonctionnement régulier des composants du système, par le fait que les constituants jouent leurs rôles. Ces systèmes ont un état de repos où ils n'agissent pas, et des états d'action qui sont les états où ils réagissent à certaines sollicitations externes ou internes correspondant à des fonctionnalités précises. Un état particulier du système est l'état d'équilibre, où celui-ci est au repos ou en action permanente. L'état d'équilibre est un état particulier et très spécifique de ces systèmes.

Equilibre des systèmes fermés

Un système fermé peut atteindre un état d'équilibre indépendamment du temps.

Ce qui fait que ces systèmes atteignent un état d'équilibre ne dépend que des rôles des composants, de ce qu'ils effectuent comme tâche au bon moment, dans le bon environnement. Si les actions de ces composants sont mal coordonnées, le système n'atteint pas d'état d'équilibre et poursuit son fonctionnement par l'activation de certains de ses constituants.

Analyse et conception des systèmes fermés

En fait, le point fondamental concernant les systèmes fermés est le fait qu'ils réalisent une fonction générale bien définie, c'est-à-dire conçue à l'avance, totalement maîtrisée et résultant essentiellement des diverses fonctionnalités de ses composants. Par cela, on pourra les concevoir à l'aide de méthodes d'analyse claires, en partant de leurs fonctions générales jusqu'à aboutir à la

fonction de chacun des composants élémentaires. On peut appliquer pour leur conception une méthode par décomposition. On partira, dans cette décomposition, des fonctions les plus générales du système pour aboutir aux fonctions les plus particulières, celles des constituants élémentaires ainsi définis. Mais on pourra aussi partir de constituants élémentaires bien définis et disponibles et aboutir, par des agrégations et compositions, au système dans son entier, et en obtenant ainsi le même système. La compréhension du système est basée sur une propriété de *symétrie de sa conception* encore appelée *de décomposabilité entière*.

Propriété de symétrie de conception

Un système fermé se comprend comme composé de constituants élémentaires dont l'intégration fait le système ou bien comme un système vu globalement et qui se décompose en constituants de plus en plus simples. Les deux voies sont symétriques : la composition et la décomposition conduisent au même système.

On pourra également décomposer les changements d'états de ces systèmes de manière précise, en l'assimilant à un automate à états.

Les systèmes fermés en informatique

En informatique, un système fermé est représenté par un ensemble de fonctionnalités totalement définies et instanciées, c'est-à-dire réalisées par des modules bien codés. L'ensemble des fonctionnalités est instancié par un ensemble de modules en formant un tout cohérent. Le système est entièrement construit, et c'est en ce sens que l'on dit que les fonctionnalités sont toutes instanciées. Il est maîtrisable de son analyse à son fonctionnement.

Les systèmes de calcul

La plupart des systèmes artificiels réalisés par l'Homme, lorsqu'il développe les innombrables outils de ses sociétés marchandes, sont des systèmes fermés. Ces systèmes sont construits à partir de la définition de leurs rôles compris comme fonctionnels. Ils ont une connotation totalement utilitaire : on souhaite construire un système qui exerce une action précise dans une situation précise et pendant une durée bien définie, pour la satisfaction de ses utilisateurs. L'action qu'exerce le système dans son environnement est déterminée par la correspondance entre un état de l'environnement et la modification que l'on souhaite apporter à cet état : le système a bien un rôle d'outil, et l'ensemble de ces systèmes forme le vaste domaine des entités technologiques.

La manière la plus simple de définir des systèmes fermés est de les concevoir comme réalisant des calculs. Le système doit opérer de manière absolument précise sur les éléments de son domaine d'application : il reçoit des entrées, effectue les calculs correspondants et retourne des résultats. Les résultats délivrés sont des éléments appartenant aux domaines de définition des variables du système, sans plus.

Contrôle XXXX

Dans cette approche, la fonction que le système instancie peut être considérée comme étant le résultat de la composition de multiples fonctions plus simples. Ainsi, le système sera vu comme la composition de ses différentes fonctionnalités locales. Souvent, le système doit globalement optimiser une certaine fonction donnée sous des contraintes diverses et son architecture sera conçue pour lui permettre de réaliser cette optimisation. Un système de calcul résout un problème et, en informatique, résoudre un problème revient toujours à expliciter une solution, à la calculer effectivement pour la fournir à l'utilisateur.

Cette façon de voir un système artificiel provient clairement de l'approche behavioriste selon laquelle, pour tout organisme, le stimulus déclenche la réponse appropriée. Les entrées peuvent être multimodales, c'est-à-dire venir de catégories différentes, et les sorties peuvent être textuelles, analogiques, graphiques ou sonores. Le système implémente une fonction qui ne variera pas et qui traite des données appartenant à son domaine de définition. Il est

construit de façon très adaptée à un problème bien posé, dans un environnement qui est considéré comme permanent.

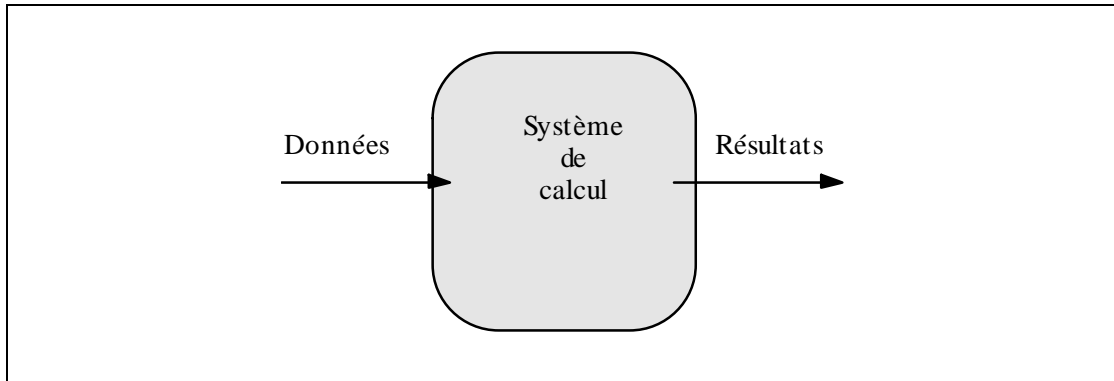


Figure XXI. Système de calcul

Pour de tels systèmes, la notion de sous-systèmes en interaction se ramène à celle d'un ensemble de composants s'échangeant les bonnes informations au bon moment. Le système est construit à partir d'une démarche d'analyse - conception validée, en s'appuyant par exemple sur une méthodologie par objets décrite en UML [Muller 1997]. On peut dire que l'architecture de ces systèmes est plutôt "centrée composant", en ce sens que le système se ramène à un ensemble de composants aux caractères fonctionnels précis et qui interagissent de façon appropriée entre eux [Haton 1991]. Ces caractères de fonctionnalité des composants ainsi que leurs relations sont précisés et analysés avant que de construire et faire fonctionner le système. Ce fonctionnement n'est alors que la mise en mouvement d'une structure complètement prédéfinie et qui doit se comporter comme l'analyse l'a prévu.

La méthodologie d'analyse - conception par objet, largement utilisée aujourd'hui en informatique, se situe au niveau de réalisation des systèmes de calcul [Cardon 1999]. Il s'agit de construire un système à partir de ses constituants bien définis, de telle sorte que l'assemblage de ceux-ci forme le système. On peut alors affirmer qu'un tel système revient strictement à la somme opératoire de ses composants.

Les systèmes de calcul se spécialisent en systèmes solveurs d'un problème ou bien d'une classe de problèmes. La distinction est affaire de complication de l'architecture, c'est-à-dire que le système comprend un peu ou beaucoup

de modules spécialisés capables de communiquer entre eux en s'échangeant des données pertinentes au bon moment.

Systemes avec apprentissage : le cas de l'adaptation progressive

Les systèmes de calcul se caractérisent par la double permanence de leur structure et de leur environnement. Ce cadre n'est évidemment pas général et, très souvent, l'environnement au moins se modifie. Dans ce cas, un système de calcul peut apparaître très vite comme non adapté pour satisfaire à ses fonctionnalités. Si les changements survenus dans l'environnement constituent un nouvel environnement différent mais stable, on peut envisager de modifier le système de calcul pour l'adapter, c'est-à-dire changer certains de ses composants. Sinon, le système doit être repensé en système capable d'apprentissage. Et dans ce cas, son architecture sera différente.

Un système capable d'apprentissage peut se concevoir, de manière minimale, comme un système doté d'une boucle de "*feed-back*", qui peut mesurer la qualité de sa réponse par rapport aux données qui l'ont mis en activation et modifier son système de calcul pour améliorer sa réponse. C'est la première approche de la cybernétique, dans laquelle la sortie du système est réintroduite comme nouvelle entrée, pour faire se modifier le système et l'adapter au mieux à cette entrée [Clergue 1997]. Dans ce cas, l'adaptation aux données venant de l'environnement est le principe d'adaptation du système.

De tels systèmes diffèrent des systèmes de calcul par un élargissement significatif de la classe des problèmes qu'ils sont capables de résoudre : ils doivent résoudre des problèmes à partir d'une base et avec toutes leurs variantes. On remarque que les problèmes à résoudre constituent encore la structure fonctionnelle de ces systèmes : ils sont construits à partir de la classe, ouverte, des problèmes qu'ils seront aptes à résoudre.

Ils sont ainsi composés d'un module réalisant les calculs et d'un sous-système assurant l'amélioration de la concordance entre les entrées et les sorties. Ce sous-système réalise l'apprentissage du système [C.f. figure 2].

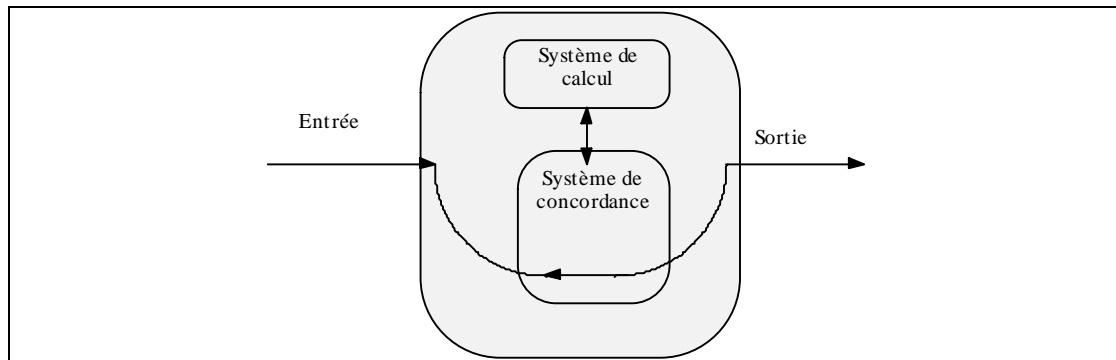


Figure 2. Système avec apprentissage

Le système ne possède pas nécessairement de sous-système de représentation de l'environnement, à partir duquel il échafauderait des plans adaptés. Il s'agit simplement, ce qui n'est d'ailleurs pas si simple, de rendre la réponse du système la plus adéquate possible aux données courantes qu'il reçoit, alors que ces données varient plus ou moins significativement par rapport à des bases de cas connus par le système.

Systemes neuronaux

Les systèmes ouverts

Un système fermé, avec ou sans apprentissage, est constitué d'entités dont les caractères sont essentiellement fonctionnels et ces caractères sont donnés *a priori*. C'est un système apte à résoudre une classe de problèmes précis ou des classes de problèmes précis. Leur rôle et leur architecture sont strictement centrés, sur les problèmes qu'ils doivent résoudre, dès l'analyse, tout au long de leur conception et durant leur fonctionnement.

La notion de système ouvert vient des travaux de Ludwig von Bertalanffy [Bertalanffy 1973] et présente une alternative à la limitation de la notion de

système fermé lorsqu'on s'intéresse plus particulièrement aux systèmes vivants. Von Bertalanffy s'est intéressé principalement aux systèmes vivants et il remarquait qu'il existe une différence essentielle entre un organisme vivant et un organisme mort : l'organisme vivant est “ *le siège d'innombrables processus chimiques ordonnés* ”, ce qui n'est absolument plus le cas de l'organisme mort pour lesquels les processus ne sont plus ordonnés. La relation entre les composants du système est donc essentielle et produit ce que l'on peut appeler un certain *ordre* [in von Bertalanffy]. Cet ordre est en fait une cohérence et une régularité internes dans l'ensemble des processus. C'est ce qui conduit à considérer l'organisation du système comme non chaotique mais régulée, dégageant un type de fonctionnement présentant des caractères affichés de permanence.

Pour préciser ce type de système, nous allons considérer qu'ils sont composés de composants polymorphes : la fonction d'un composant du système sera *en partie* seulement déterminée lors de la création du système et le fonctionnement insistera surtout sur les relations, les processus d'échange entre les composants qui préciseront ces fonctions. Chaque composant aura ainsi, initialement, un domaine d'action opératoire déterminant ses rôles possibles et leur champ d'application. Le fonctionnement du système précisera ces rôles à chaque instant du fonctionnement, en prenant en compte dans la définition du rôle d'un composant ceux des composants connexes.

Systeme ouvert

Un système est dit ouvert s'il est constitué de nombreux composants polymorphes en interrelation, s'il est nécessairement en relation d'échange avec son environnement et si ses composants se détruisent et se régénèrent par le fait de son fonctionnement, altérant ainsi continûment leurs fonctionnalités.

Dans un système ouvert, la notion centrale est donc celle précisant l'ordre des processus d'échange et d'interrelation entre les composants. Nous allons développer cette importante notion.

Un système fermé fonctionne avec une certaine organisation induite par la nature fonctionnelle de ses composants : ceux-ci s'activent selon leurs fonctionnalités précises, dans un certain ordre prévu à l'avance et produisent

des effets qui sont les entrées d'autres composants. Il y a donc un ordre dans le fonctionnement du système fermé, fixé par le rôle précis et permanent que tient chaque composant. On peut ainsi dire que ces composants ont des fonctionnalités permanentes. On peut connaître cet ordre sur le diagramme dynamique du système (DEVELOPPER). Mais l'ordre, les rôles et les actions à effectuer, est premier et les composants ne sont là en fait pour satisfaire à cet ordre. Ces composants sont agencés pour que le fonctionnement conduise à des actions coordonnées, précises, totalement maîtrisables à l'avance.

Dans le cas d'un système ouvert, la notion d'ordre est totalement différente. Le fonctionnement du système produit un *certain ordre* par l'activité coordonnée de ses composants, qui n'est ni aléatoire ni chaotique. Initialement, ces composants sont fonctionnellement polymorphes et assez peu adaptés et ils se spécifieront ou se développeront par le fait du fonctionnement. Le fonctionnement de chaque composant entraîne l'activation de certains autres et le fonctionnement de ces autres composants, après activation transitive, modifiera en retour le régime de fonctionnement de ce premier composant. Le système est donc le site de multiples cycles de fonctionnement relativement locaux. L'activation des composants se stabilise par groupes pour produire finalement un état global qui résulte essentiellement de la coordination régulière, sinon stabilisée, entre tous les composants. Ceux-ci peuvent agir de diverses façons, ils peuvent avoir diverses fonctionnalités, et l'une sera active pour chaque composant à chaque instant produisant ainsi l'état global courant en tenant compte des interactions entre les composants. La mise en action du système est produite par des stimuli externes *et* par son fonctionnement même, et les stimuli externes entrent dans le système de façon continue. Celui-ci est alors perpétuellement le siège de processus internes d'activation et de modification du rôle et de l'état de ses composants.

Ordre structurel

Un système ouvert se conçoit comme un ensemble ordonné de sous-systèmes en interaction, ces interactions représentant un certain ordre, de manière à ce que son état représenté à un certain niveau d'observation ne soit que le résultat des échanges entre les composants du niveau inférieur.

L'ordre dont il est question n'est pas la résultante de fonctionnalités rigides dont seraient dotés les composants, mais essentiellement la résultante des *interactions coordonnatrices* entre des composants, dont les rôles ne sont que relativement stables. Les composants ne sont pas des éléments fonctionnels fixés, mais ils ont des comportements polymorphes : ils se complètent, se modifient, se spécialisent, se généralisent, s'altèrent. En fait, les composants du système changent et évoluent. Et pourtant, le système a un comportement global qui semble relativement permanent à l'observateur. Il existe différents niveaux d'observation de telle manière que le niveau minimal soit le siège d'interactions incessantes et le niveau global puisse être considéré comme stable.

Par exemple, un être humain est le siège de processus biochimiques incessants, comme le fonctionnement, la vie, la mort et le remplacement de chacune de ses cellules, qui sont tels que chaque être humain est absolument singulier dans sa structure et son organisation fines. De plus, le nombre de ces composants de base, les cellules, est absolument spécifique pour chaque être humain. Pourtant, observé à son échelle d'être vivant sur sa planète, tous les humains paraissent bien semblables et ce fait amène à penser qu'il sont les éléments semblables d'une même espèce, l'espèce humaine. Il y a donc un sérieux problème de changement d'échelle où, selon les cas, le système est le siège de processus incessants et singuliers ou bien peut être considéré comme stable et ne semble pas varier.

Pour préciser le type d'état de régularité que peuvent atteindre de tels systèmes ouverts, introduisons la notion d'état équifinal [von Bertalanffy op. cité] :

Etat équifinal

Un état équifinal est un état global stable du système qui peut être atteint à partir de nombreux états initiaux différents.

Cet état caractérise la régularité du niveau global par rapport à l'instabilité très forte du niveau minimal où les processus sont incessants. De par le fait de la densité des processus bouclés de l'état minimal, il semble impossible de dégager la notion d'état initial distingué. Dans un état équifinal, le système assure sa permanence structurelle au niveau global, bien que ses composants élémentaires changent sans cesse d'état.

Etat stable

Un système ouvert est conduit à la recherche d'états stables de par son fonctionnement même.

Ce point est fort délicat. Un système ouvert, pour ne pas avoir un comportement aléatoire ni chaotique qui le conduirait à sa destruction et à l'impossibilité de se reproduire, doit tendre vers des états stables. Cette nécessité d'atteindre des états stables est un caractère fondamental du vivant. Le vivant génère, à une certaine échelle, de la régularité et même une certaine permanence. C'est une tendance organisationnelle qui se dégage à partir de composants instables en réorganisation permanente. C'est cette tendance qui conduit l'œuf zygote diploïde dans un processus de création très instable et relativement aléatoire vers un organisme final achevé, qui sera toujours, au niveau minimal, le siège de processus instables mais qui sera, au niveau global, au niveau de l'organisme complet, le siège d'états stables. Remarquons bien que cet état stable, est un état stable parmi beaucoup d'autres. Ce n'est en rien un état d'équilibre: c'est un état équi final qui assure la permanence des actions significatives du système dans son environnement.

Par exemple, observé à son échelle mais dans une ville, le comportement de tout individu peut être considéré comme complexe. Ses déplacements, ses contacts et actions sont des processus incessants, contingents, peu prévisibles. Mais la ville, considérée comme un organisme, un organisme fait d'homme et de formes architecturales, est stable dans la durée; On observe ses modifications historiquement. La notion d'état stable semble relative.

Proposition sur la stabilité

La notion d'état stable est soit un équilibre et alors la stabilité est invariante, soit une régularité comportementale observée à l'échelle d'un système borné par ses contraintes organisationnelles limitatives.

Un état d'équilibre ne change pas seul. Il est définitivement permanent et seule une action extérieure peut l'annihiler. Nous posons que la notion de recherche d'état stable vient de la propriété de limitation intrinsèque du système. Il y a trois cas :

1. ou bien le système est une partie d'un autre, qui le possède, l'englobe et l'utilise,
2. ou bien le système a une limitation propre à son déploiement, et il est, par cette limitation, contraint, limité dans ses états,
3. ou bien il n'a pas de limite et il finit par s'annihiler et se dissoudre dans l'univers.

Nous poserons que cette limitation est le *bord* du système. Tout système vivant à un bord, une membrane, qui le distingue de l'environnement mais qui est au contact direct de cet environnement. Le bord d'un mammifère, mammifère que l'on sait composé de cellules en actions et interactions incessantes, est son enveloppe corporelle, sa peau, ce qui est en contact direct avec l'environnement. Cette surface, comme tout bord, est de dimension d'une unité inférieure à celle de l'organisme. Pour un mammifère, le bord est une surface de dimension deux. Nous posons que la notion de bord est significative, et ceci systématiquement, de la notion de stabilité. Lorsqu'un organisme se développe de telle manière qu'il se dote d'un bord en contact avec un autre milieu, il y a une notion de recherche de stabilité.

Un œuf zygote diploïde qui formera un organisme vivant est généré par une femelle et se trouve ainsi dans un environnement qui ne lui est pas étranger, celui de sa génitrice. Un fœtus n'a ainsi pas vraiment de bord, il a une surface de contact. Par contre, l'œuf des vivipares a un bord, dès que pondu et situé dans un milieu qui le place en posture de distinction.

Cette proposition caractérise la stabilité comme une certaine régularité seulement à un certain niveau d'observation. Si le niveau change, la stabilité n'apparaîtra plus comme telle. C'est donc essentiellement un point de vue, et plus particulièrement un point de vue spécifique au vivant.

Les systèmes adaptatifs

En définissant les systèmes ouverts, on s'intéresse principalement à leur organisation: on insiste sur le fait qu'ils sont constitués de processus internes d'autorégulation et qu'ils échangent de la matière avec leur environnement. Dans une autre optique, on peut s'intéresser principalement au comportement d'un système dans la durée et à la façon dont il réagit aux sollicitations de son environnement. Certains systèmes ont un type de relation avec leur environnement qui les pousse à se comporter d'une certaine manière établissant une correspondance étroite avec leur environnement. Ces systèmes seront donc en relation continue d'échange avec l'environnement et seront composés d'entités plastiques : ce seront donc des systèmes ouverts. On insistera donc sur un caractère particulier : leur évolution dans la durée, et particulièrement leur constitution.

Nous traiterons des *systèmes au comportement adaptatif* en parlant, plus brièvement, de systèmes adaptatifs. Nous allons nous intéresser au cas des organismes vivants pluricellulaires qui sont par nature adaptatifs et qui développent des capacités d'action particulières sur l'environnement.

Les tendances fondamentales

Un système ouvert se caractérise comme tel par sa situation d'échange nécessaire de matière ou d'énergie avec son environnement et de modification structurelle continue. Un tel système se comporte selon ces caractères pour une certaine raison : il n'échange pas de la matière avec l'environnement ni ne se restructure continuellement par hasard ou opportunité. En fait, il ne *peut pas* faire autrement. Sa structure le conduit à adopter une réorganisation continue des relations entre ses composants car ceux-ci ne peuvent que se réorganiser.

Principe

Un système adaptatif est un système ouvert qui se comporte par échange avec l'environnement et par réorganisation continue de sa structure par simple nécessité.

Ces systèmes se comportent comme ils se comportent parce qu'ils sont maintenus en état de fonctionner. Cet état général qui consiste à les laisser être opérant, selon les possibilités de leurs organes et sous la contrainte de leur membrane, sera défini par une tendance centrale, la tendance à se maintenir le mieux possible en activité. Cette tendance provient de l'organisation des composants du système et est essentiellement basée sur l'existence de processus multiples formant un certain ordre. L'existence de ces processus et du bord du système se résument en une tendance à maintenir leur unité.

La tendance centrale

L'architecture des systèmes ouverts est essentiellement basée sur des processus. Ce fait engendre, pour que le système se maintienne en état de permanence existentielle sous la contrainte de limitation de son bord, une tendance centrale, au niveau du système, organisant la cohérence de ses processus.

La tendance centrale sera la qualification existentielle du système. Cette notion philosophique est compliquée et nous reviendrons sur sa pertinence. La science ne l'a pas bien appréciée et cela lui coûte assez cher, dans son déval technologique réducteur.

Cette tendance centrale qui exprime l'autonomie des systèmes ouverts à se comporter se déclinera, en tenant compte des différentes fonctionnalités de leurs organes, en besoins dits fondamentaux. Les systèmes ouverts sont ainsi vus comme des systèmes qui ont des moyens d'action, des besoins fondamentaux et des limitations organiques. Ils sont le siège de conflits, de tensions. Ces conflits et ces tensions sont opérantes à l'échelle du système mais se retrouvent à toutes les échelles à l'intérieur du système, et en particulier au niveau des composants minimaux.

Ainsi, les besoins fondamentaux du système dériveront de la tendance centrale. Ils seront appréciés au niveau du système, c'est-à-dire au niveau de l'ensemble des processus. Il s'agira du besoin de se mettre en action, de se déplacer et plus particulièrement de se nourrir, de se reproduire, de

découvrir, de communiquer ... de n'être surtout pas être totalement inactif ou actif de manière incohérente en perdant son énergie. Et par la nécessité à se comporter et à agir que leur imposent ces besoins fondamentaux, ces systèmes seront amenés à se mettre en situation d'action sur leur environnement, à se socialiser pour faciliter cette action. Nous appellerons ces systèmes des *systèmes adaptatifs*. Remarquons bien que ces besoins fondamentaux ne sont générés par aucun composant fixé du système et résultent d'une tendance centrale prégnante et diffuse.

Besoins fondamentaux

Certains systèmes, naturels ou artificiels, sont conçus pour qu'ils satisfassent à des besoins très généraux qui orientent leur comportement de manière décisive. Ces besoins généraux, multiples et contradictoires et générés par l'organisation même du système, seront appelés des besoins fondamentaux.

On doit remarquer que les besoins fondamentaux doivent être nombreux et contradictoires. Ils sont issus de l'organisation même du système, qui est le siège de comportements instables incessants. Dans le cas où le système n'a qu'un besoin fondamental, ou que tous les besoins sont fortement concordants et constituent une hiérarchie avec un besoin dominant, celui-ci se ramène alors à un système de calcul avec un but bien distingué, localisé dans un composant ad hoc.

La question première concerne l'origine des besoins fondamentaux. Au niveau global, le système est limité par sa membrane, son bord. Il existe en se distinguant de son environnement. Au niveau minimal, le système adaptatif, qui est un système ouvert, est constitué d'entités de base en interaction par l'activation de processus multiples. Ces entités ne sont le siège d'aucun besoin particulier : elles fonctionnent comme leur structure le leur permet et selon la rapidité de leurs échanges. Elles ont un comportement strictement darwinien. A un autre niveau moins élémentaire où l'on distingue des organes fonctionnels dans le système, les entités se sont groupées et spécialisées pour former des amas dont on peut dire, en les observant, qu'ils ont un rôle, une fonctionnalité dans le système. Ces amas sont soumis, par leur existence et par le fait qu'ils sont en relation et qu'ils constituent un système, à des tendances fondamentales qui leur permettent de garder leur cohérence et qui sont le fait que leur organisation tend vers certains états stables plutôt que vers d'autres.

Hypothèse de gradation

Les tendances fondamentales générales du système telles que l'on peut les observer proviennent des capacités comportementales locales des constituants du système.

Mais nous allons faire une hypothèse forte quant à ces tendances fondamentales. On pourrait penser qu'elles ne sont que le résultat virtuel, obtenu peut-être mécaniquement, de la composition des éléments de plus bas niveau fonctionnant comme des systèmes ouverts. Les tendances ne seraient que des façons de décrire le système, dans lequel seul le fonctionnement en système ouvert des composants de bas niveau existerait. Le système serait alors architecturé comme une hiérarchie ordonnée, où les éléments minimaux réactifs détermineraient les composants fonctionnant en système ouvert et où le système général n'apparaîtrait que comme la composition de ces composants, pour tout observateur. Cette voie nous semble réductrice, car elle simplifie par trop le problème. Elle n'explique pas la capacité d'adaptation et de mutation des composants du système et élude l'équifinalité de ses états généraux.

Les tendances fondamentales sont *réifiées* au niveau de l'organisation générale du système, elles ont une réelle existence par le fait de l'ordre des multiples processus coordonnés. Par cela elles interagissent effectivement sur les éléments constitutifs du système. Le système a un fonctionnement bouclé entre ses différents niveaux, composants et niveau global exprimant les tendances, et on peut dire qu'il s'adapte à *lui-même* avant de s'adapter à son environnement.

Hypothèse de réification des tendances fondamentales

Les tendances fondamentales d'un système adaptatif sont réifiées dans la matérialisation des interactions entre ses composants à ses différentes échelles d'organisation : cette réification est réalisée par l'existence d'une forme dynamique représentant l'état central du système.

Cette forme dynamique sera effectivement considérée comme une forme et pourra peser sur le comportement même des composants. Nous fonderons toute notre architecture de ces systèmes sur l'existence et l'utilisation de cette forme.

Adaptativité

La question est maintenant de déterminer le type de structure que doit avoir un tel système, qui ne peut que chercher à s'adapter aux différentes situations, plus ou moins opportunes, que lui impose l'environnement.

Hypothèse de plasticité

Un système soumis à des besoins fondamentaux nombreux et contradictoires et qui se comporte selon l'orientation donnée par ses tendances fondamentales, doit avoir une structure basée sur des composants fonctionnant comme des entités plastiques communicantes, qui peut se modifier, se reconformer à chaque fois qu'il adopte une nouvelle mise en situation par son environnement.

Les besoins fondamentaux permettent, par le fait qu'ils sont multiples et contradictoires, de situer le système dans un environnement changeant autrement qu'en posture strictement réactive. Ils permettent de placer le système en posture de questionnement, pour faire choix de sa conduite, par adaptation des relations entre ses composantes et en ne pouvant pas faire autrement. On pose donc qu'un système est adaptatif, d'abord structurellement et de façon *inévitable*, en ne pouvant pas ne pas l'être.

Il est parfois possible de représenter les besoins fondamentaux par des variables particulières, internes au système, dites variables homéostatiques. Ces variables permettent ainsi de définir des domaines de viabilité du système et des seuils d'acceptabilité quant aux valeurs que peuvent prendre ces variables. C'est la solution la plus simple pour définir des besoins fondamentaux.

Notion intuitive d'adaptativité

Un système soumis en permanence à des besoins fondamentaux adopte un comportement conforme à la fois à ces besoins et à l'environnement courant. Son comportement est donc dépendant du moment et du lieu,

c'est-à-dire qu'il réalise sa mise en situation dans son monde. On dit qu'il s'adapte en se situant.

La notion qui vient immédiatement à l'esprit, à la suite de cette définition intuitive de l'adaptativité, est celle de hiérarchie d'adaptativité : il apparaît en effet qu'il y a des systèmes fortement adaptatifs et certains autres qui le sont moins.

Profondeur d'adaptativité

En ce qui concerne les systèmes adaptatifs, il existe des niveaux de décomposition non indépendants dont on peut dire que chacun définit un certain système adaptatif.

Cela signifie qu'un système avec un seul niveau d'adaptativité est composé d'un mécanisme d'adaptativité, d'une fonction d'adaptation. Il a une structure fonctionnelle et l'un de ses mécanismes possède, et lui confère, des qualités d'adaptativité.

Mais par contre, tout organisme vivant possède systématiquement plusieurs niveaux d'adaptativité. On passe ainsi d'une population, qui s'adapte socialement à l'environnement, à l'individu, qui s'adapte dans l'environnement, puis à l'organe, qui adapte son rôle à ses fonctionnalités, puis à la cellule ... Un tel organisme est le site de hiérarchies de systèmes adaptatifs non indépendants.

Un système artificiel aura au plus trois niveaux d'adaptativité : la population artificielle, l'agent adaptatif et le composant adaptatif de l'agent.

Nous pouvons maintenant préciser ce qui fait, organisationnellement, qu'un système est adaptatif.

Système adaptatif, définition générale

Un système adaptatif est un système dont la raison à fonctionner est conduite par la satisfaction à ses besoins fondamentaux. Pour satisfaire à ces besoins, le système doit adapter son comportement à l'environnement. Certains éléments de structure seront, pour cela, plastiques, et le système modifiera leur organisation tout en maintenant

cette organisation dans un domaine acceptable pour ses besoins fondamentaux.

Selon cette définition, fort générale, un système adaptatif obéit à une certaine téléonomie exprimée par ses besoins fondamentaux et se comporte pour satisfaire à ces besoins selon les opportunités que présente l'environnement.

Plasticité structurelle

L'architecture d'un système adaptatif doit lui permettre de réaliser des modifications significatives des couplages entre ses composants, pour que son action sur l'environnement soit conforme immédiatement, localement et globalement, à ses tendances fondamentales. Nous dirons que sa structure est plastique et qu'il procède d'activité réorganisationnelle.

Un système adaptatif est formé de nombreux composants élémentaires, de même nature ou bien de natures différentes. Sa structure, en entendant par structure l'ensemble statique de tous les éléments qui le composent, est constituée par l'ensemble de ses composants en relations d'interopérabilité, forte et incessante. Il est bien évident que ces composants ont un rôle fonctionnel, mais ce rôle peut être polymorphe et sa définition n'est pas réduite au seul composant. Elle est aussi fournie par le reste du système. La notion de composant, dans de tels systèmes, est particulière, car elle n'a pas de caractère de localité stricte.

Un composant, qui sera par exemple un organe ou une fonction locale dans le système, aura le rôle que lui conférera à la fois sa spécificité de composant, sa structure et ses degrés de liberté, le fait qu'il apparait comme un constituant identifiable, et aussi le rôle que lui permettra d'avoir le système considéré dans son entier. Aucun composant n'est indépendant des autres, ni dans sa définition, ni dans son fonctionnement, ni dans son rôle. Il est équivalent à un sous-système couplé par nécessité à *tous* les autres sous-systèmes. On qualifiera un tel composant d'adaptatif.

Composant adaptatif

Un composant adaptatif est une entité de base, précise et identifiée, du système adaptatif dont le rôle est conféré à la fois par sa structure propre d'entité, par chacun des autres composants et groupe de

composants et également par le système lui-même, considéré dans son entier.

Le rôle que peut jouer un tel composant ne peut donc être défini à partir de sa seule structure. Le rôle que peut conférer la structure est donc insuffisant et il doit être nécessairement précisé par le système considéré dans son entier. Dans le cas d'un système artificiel, la définition d'un composant et son insertion dans l'ensemble formant le système n'est pas aussi simple que dans le cas des systèmes de calcul, qui sont bien la stricte somme de leurs composants. Nous avons déjà précisé ce point en définissant, pour de tels systèmes, la notion de *complexité organisationnelle* [Cardon 1999].

Avec de tels composants, la notion d'architecture du système n'est plus aussi fonctionnelle ni fixée a priori que dans le cas des systèmes de calcul. Le système est bien constitué par l'ensemble de ses composants, mais cet ensemble a une existence propre, déployée par le fait de son fonctionnement même. Le système est plus que la somme de ses parties, au sens où l'ensemble influe sur le statut de chacune de ses parties, et réciproquement, ce qui est bien conforme à la démarche systémique proposée par E. Morin en ce qui concerne les systèmes complexes [Morin XXX].

Architecture d'un système adaptatif

L'architecture d'un système adaptatif est une organisation générée à partir d'un plan, c'est-à-dire une structure qui se déploie et se modifie dans le temps, permettant de conférer à chacun de ses constituants un rôle de composant adaptatif.

Un tel système est un système dynamique dont les composants, qui sont adaptatifs, ont des rôles de systèmes dynamiques locaux.

La construction d'un tel système ne se ramène donc plus à un assemblage de parties indépendantes à mettre en relation effective seulement lors du fonctionnement, mais c'est une *construction adaptative*, où l'insertion d'un nouveau composant remet en situation ceux déjà présents. La construction obéit à un plan complexe [Cardon 1999].

On remarque que l'architecture du système adaptatif est typiquement celle d'un système dynamique, c'est-à-dire d'un système qui n'existe que dans et avec le temps, avec, en plus, une modification organisationnelle réalisée à

partir des modifications de ses composants, et de leurs relations de couplage.

L'organisation et la modification de la structure du système adaptatif, qui consiste au moins en la modification des relations entre ses composants, et en général en la modification de ceux-ci, se réalise selon les tendances fondamentales qui conduisent son comportement. Ainsi, le système ne se contentera pas de réagir strictement aux stimuli venant de l'environnement, mais sera principalement soumis à ses besoins fondamentaux, qui lui feront saisir et interpréter ces stimuli.

Interprétation

Le fait d'adapter son organisation à ses besoins fondamentaux en tenant compte de l'environnement, revient à considérer les stimuli de l'environnement systématiquement selon certains points de vue. On dira que le système interprète ses stimuli.

Un système adaptatif aura à la fois un processus d'apprentissage dérivé de la boucle de "feed-back" cybernétique entre entrée et sortie, et la capacité de modifier son organisation interne pour tenir compte à la fois de son écart d'adaptation à l'environnement et de ses besoins fondamentaux correspondant à son maintien en activité. Le système devra donc à la fois s'adapter à l'environnement et à son organisation, sous la conduite de besoins irrépressibles.

Notons qu'un système adaptatif n'a pas nécessairement de sous-système de *représentation* de l'environnement. Il suffit qu'il puisse exprimer, dans sa structure même et particulièrement dans la réorganisation de celle-ci, ses tendances fondamentales, qu'il ait une aptitude à avoir des mécanismes d'interprétation souples des informations venant de l'environnement, qu'il réalise une modification organisationnelle adéquate aux stimuli, qu'il améliore cette adéquation lors de son fonctionnement, tout en maintenant sa structure en état satisfaisant pour ses besoins fondamentaux.

La détermination de cette organisation adéquate aux stimuli environnementaux sous la pression de ses besoins fondamentaux peut se réaliser en rendant l'organisation plastique et soumise à certaines tendances fondamentales (chapitre XXX).

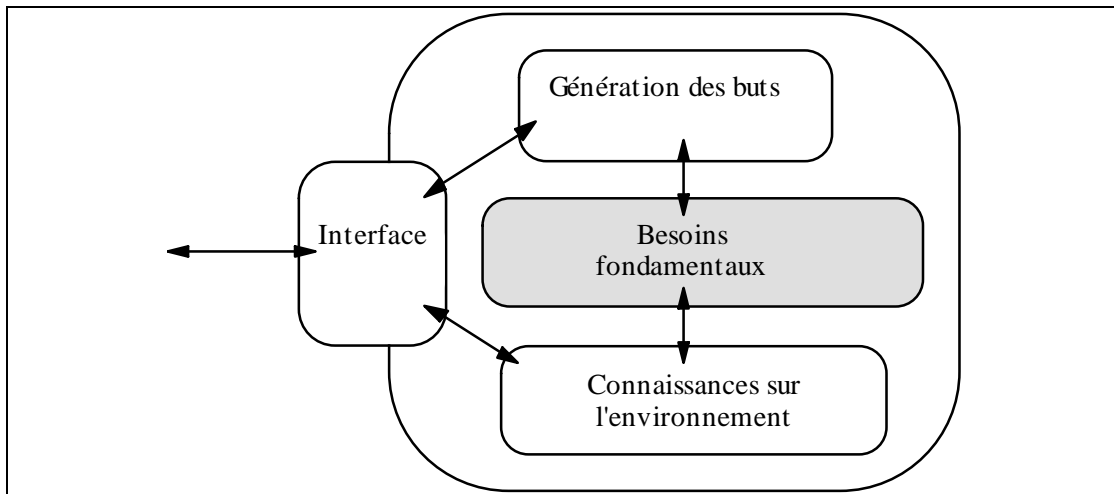


Figure . Schéma d'un système adaptatif

On peut se poser la question de la raison à exister pour un tel système adaptatif. Si, pour un système de calcul, la raison à exister vient clairement de son concepteur et se ramène à le satisfaire en effectuant ses calculs dans les meilleures conditions, il n'en est pas de même pour un système adaptatif. Un tel système n'a pas de fonctionnalité précise, ni surtout unique. Il contient, ou révèle, les fonctionnalités adaptatives de ses composants, et celles-ci changent au cours de son fonctionnement. Ce que ce système a, globalement et de manière permanente, ce sont ses besoins fondamentaux. Il est construit en ayant ces besoins, en en étant doté effectivement, et *pour satisfaire à ces besoins* en fonctionnant. Sinon, il ne survit pas et, s'il est artificiel, il ne peut tenir son statut de système adaptatif et ne peut que se dégrader en système de calcul plus ou moins performant.

Hierarchie des systèmes adaptatifs

On peut évidemment définir plusieurs classes de systèmes adaptatifs, selon leur architecture et leurs performances adaptatives. On peut s'appuyer pour cela sur les hiérarchies définies dans le vivant.

On dira qu'un système adaptatif est *faiblement organisé* si ses composants, générant des entités fonctionnelles, sont permanents et si seules leurs relations changent au cours du fonctionnement.

On dira qu'un système adaptatif est *fortement organisé* si ses composants, générant des entités fonctionnelles, se modifient, par clonage ou par reproductions, et si leurs relations se modifient au cours de son fonctionnement.

On dira qu'un système adaptatif est *très fortement organisé* s'il est fortement organisé et s'il peut conduire son comportement en l'évaluant, en se mettant en situation.

CHAPITRE II

L'INFORMATION DANS UN SYSTEME

La dualité informationnelle

Tout système vivant, qu'il soit naturel ou artificiel au sens d'un animat, prend de l'information dans son environnement, et il en délivre. Un système entièrement fermé ne peut exister comme système naturel. Il est tout au plus un objet théorique ou une machine. La prise d'information revient à saisir des caractères d'aspect, des mouvements, des sons, des différences de formes d'objets mobiles dans l'environnement, selon la capacité de prise d'information du système, c'est-à-dire selon les performances de ses capteurs. La restitution d'information revient à effectuer des actions et des mouvements dans l'environnement, comme des déplacements, ou l'émission de sons, ou encore des modifications de l'apparence externe du système, de son enveloppe ou de son interface. Le système est récepteur et émetteur d'informations.

Nous allons nous intéresser à la façon dont un organisme vivant supérieur, c'est-à-dire un organisme appartenant à une certaine population et produit par une reproduction sexuée, appréhende son milieu. Cela nous permettra de transposer certains caractères fondamentaux au niveau de l'information dans les systèmes artificiels adaptatifs.

Saillance et prégnance

L'approche sémiophysique, développée par R. Thom, définit un modèle général représentant la façon dont un organisme vivant supérieur appréhende son environnement [Thom 1988]. C'est une approche descriptive, et même existentielle, permettant de préciser la raison et la manière dont l'organisme agit dans son environnement, en précisant le rôle et la représentation des besoins fondamentaux de l'organisme.

On considère que l'organisme vivant, classé dans le vivant supérieur, est doté d'une certaine conscience, au sens d'une "carte locale" [in Thom 1990, p. 93], qui fournit une représentation à la fois de lui-même et de son univers. Cette carte, qui est organisationnellement complexe, a l'évidente propriété de se modifier, de se conformer aux variations remarquées et intervenant dans l'environnement. Il y aura deux façons de modifier cette carte, et seulement deux : soit très localement, sans conséquence notable sur ce que représente l'ensemble de la carte, soit profondément, parce qu'un signal reçu aura un effet considérable sur la carte et sur l'individu. Cette transformation profonde correspondra typiquement à l'activation des besoins fondamentaux de l'individu. Il s'agit alors de définir précisément l'effet et le rôle des stimuli sur l'organisme considéré comme un récepteur.

Pour l'organisme, toute action de préhension ou de réception sera représentée comme un objet géométrique, c'est-à-dire comme une certaine forme géométrique matérielle, dans un espace mathématique muni d'une métrique. La forme géométrique exprimera les caractères principaux du comportement de l'organisme par des champs produisant des effets sur la matière dont elle est constituée. Les caractères principaux, minimaux, de l'organisme vivant sont, entre autres : individuation, capacités motrices et opératoire dans l'environnement. Les besoins fondamentaux sont : faim, sexualité, sommeil, rôle dans sa communauté, capacité sociale... On considère donc des individus d'une certaine espèce et on s'intéresse à ce qu'*est effectivement* leur aptitude à réagir et à agir dans leur environnement, en représentant cette aptitude par une organisation d'entités géométriques.

R. Thom précise qu'il y a *action sémiotique* entre deux entités vivantes, ou entre une entité et son environnement, s'il y a transfert informationnel avec intention entre un émetteur et un récepteur [in Thom 1990, p. 54-58]. Le récepteur du transfert est donc une entité qui possède une certaine

représentation de son environnement et qui interprète ce qui lui est transféré. Le récepteur peut être un système semblable à l'émetteur, ou bien l'environnement physique lui-même. L'action de transfert, lorsqu'elle est effectuée avec une certaine intention, est donc fondatrice de l'acte sémiotique.

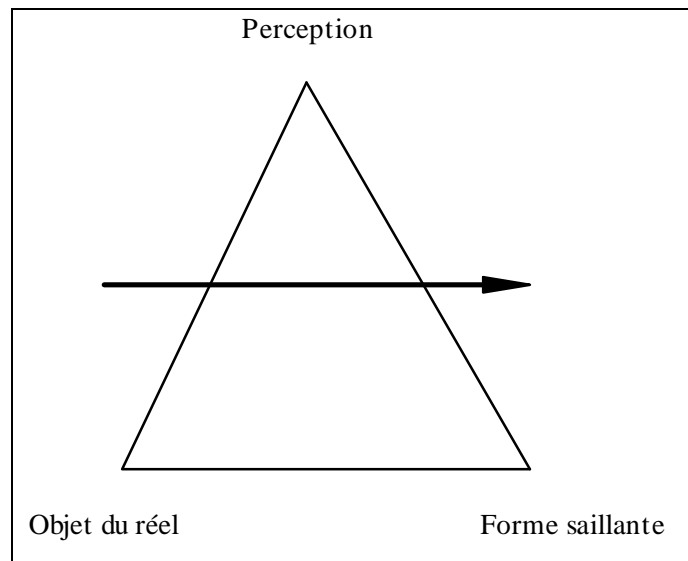
Dans tous les cas, ce qui est transféré entre l'entité émettrice d'un certain signal et l'entité réceptrice de ce signal, sera symbolisé géométriquement par une *forme*, le mot forme devant être pris strictement au sens d'être géométrique doté de propriétés topologiques. Et selon R. Thom, il y a, et il n'y a que deux types de formes pouvant être appréhendées par un l'individu vivant jouant le rôle de récepteur.

Saillances

Un forme appréhendable par l'individu récepteur est dite *saillante* lorsqu'elle "*frappe l'appareil sensoriel de l'individu par son caractère abrupt ou imprévu*" [in Thom 1990, op. cité]. Il s'agit donc du transfert d'une forme de l'environnement dans le système récepteur de l'individu, la réception ayant un caractère soudain et local, qui modifie sensiblement l'état courant de son système récepteur. Cette appréhension altère également l'état courant de l'individu, c'est-à-dire que le système de réception transmet des informations au système de représentation du monde de l'individu, qui ainsi la remarque, la reconnaît éventuellement et l'engage éventuellement à réagir.

Cette modification de l'individu reste très faible et n'est même pas mémorisée de façon permanente dans la mémoire de l'individu. Il s'agit donc du choc ponctuel, local et temporairement limité, d'une forme externe appréhendée comme telle par le système sensoriel d'un individu récepteur. Une forme saillante est par exemple un bruit fort qui intervient dans le silence de l'environnement courant, ou encore le passage d'un mobile sur le fond immobile d'un paysage que l'individu observe.

Sémiotiquement, l'objet appréhendé est une discontinuité détachée de l'environnement. Cet objet est perçu par le système perceptif de l'individu, et éventuellement reconnu, c'est-à-dire transformé en signe [Peirce], [Cardon 1990].



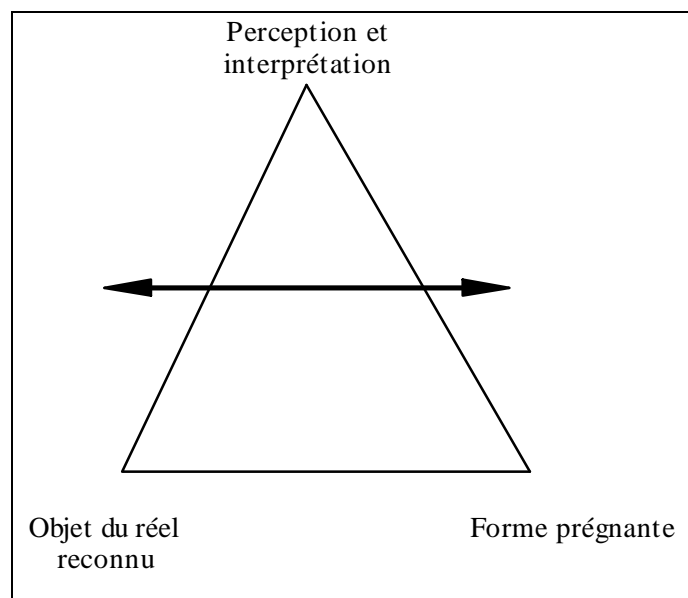
Prégnances

Une forme est dite *prégnante* si sa reconnaissance via le système sensoriel de l'individu récepteur provient du résultat d'une attente fondamentale de cet individu, qui a besoin de l'objet ayant cette forme pour son existence. Ce n'est donc plus le cas de la réception impromptue d'une forme relative à l'environnement, mais la concordance d'une forme externe reconnue avec une attente interne qui la cherchait dans l'environnement. La réception de la forme prégnante provoque une modification très importante et durable de l'individu récepteur, et l'engage à un comportement nouveau par rapport à son comportement courant. C'est par exemple la présence d'une proie dans l'environnement de l'individu prédateur, alors que celui-ci éprouve un besoin de nourriture qui le poussait à chasser.

La représentation des deux formes, saillantes et prégnantes, est évidemment différente. Une forme saillante est la reconnaissance d'une discontinuité dans un certain espace. La représentation courante du monde pour l'individu est un certain espace qui représente l'environnement, et l'irruption de la forme saillante y introduit une discontinuité plus ou moins forte. Mais l'individu qui perçoit cette forme saillante est sous l'engagement de ses tendances du moment, qui tendent à lui faire remarquer certaines formes plutôt que d'autres. Une forme prégnante reconnue est alors la réification des tensions qui engageaient l'individu à une certaine recherche.

Attracteurs

Nous avons appelé ces tensions qui dirigent le comportement représentationnel de l'individu, dans son système de représentation du monde, des *attracteurs* [Cardon 1999]. Ce sont les champs qui conduisent le système de représentation de l'individu à chercher à percevoir certaines catégories de choses plutôt que certaines autres. Les attracteurs sont capables de faire reconnaître, à partir de saillances plus ou moins précises appréhendées par le système de perception de l'individu, les formes prégnantes désirées. Dans le cas de la reconnaissance d'une saillance, l'individu est un simple récepteur de formes. Dans le cas de la reconnaissance de formes prégnantes, l'individu est engagé dans une voie comportementale, avec une certaine tension, qui n'est qu'une tension, et il trouve, soudainement, ce qu'il cherchait.



Les formes perceptibles par un individu n'ont, selon R. Thom, que ces deux caractères, très différents : des caractères de saillance ou bien des caractères de prégnance. L'individu appréhende soit des formes insolites, qu'il va sans doute caractériser et reconnaître pour y réagir, soit des formes qu'il s'attend à

trouver, qu'il recherche par nature, parce que sa morphologie propre, sa constitution, le conduisent à toujours les rechercher.

Mais l'individu est en activité dans son environnement, à partir de ce que lui permet et lui impose sa propre structure. Il ne peut reconnaître comme forme saillante que ce qu'il est apte à reconnaître et qui doit correspondre à ce qu'il cherche à reconnaître. On pose alors que toute forme saillante est reconnue par le récepteur de l'individu si elle engage à la reconnaissance d'une certaine forme prégnante dont la forme saillante est un aspect. L'individu est conduit à reconnaître des formes saillantes, ou bien prégnantes, à partir de sa capacité à d'abord reconnaître des prégnances. Sinon il ne reconnaît pas le signal venu de l'extérieur et qui est une saillance, pour lui, invisible. Ainsi, toute reconnaissance de forme mêle intimement de la reconnaissance de formes par des caractères saillants, avec des caractères de prégnance.

Etat d'engagement

Nous dirons que l'individu est dans un état *d'engagement* pour préciser que certaines prégnances sont actives dans son état courant et que toute forme saillante, pour être appréhendée, doit être, d'une certaine façon, liée à une prégnance.

Sinon, toute forme qui se présente au système de perception de l'individu est ignorée, et celui-ci n'y prête pas attention. L'individu n'a donc pas d'état que l'on pourrait qualifier "d'objectif " : c'est un certain sujet, qui a une certaine conscience des choses de son environnement.

Séquence de formes saillantes

Il est évident que la reconnaissance d'une forme externe s'effectue à partir d'une certaine suite de transformations de reconnaissances successives relatives à l'objet : le phénomène n'est en général pas une simple réaction stimulus - comportement, comme l'on posé les béhavioristes. On est ainsi conduit à considérer des séquences de transformations de caractères saillants, sous la conduite d'une ou de prégnances. Retenons bien que

l'individu est dans un état d'engagement, qu'il est soumis, à tout instant, à certains attracteurs plus ou moins forts qui orientent l'attention de ses récepteurs. Cela constitue un certain contexte d'engagement, qui va lui faire interpréter certaines saillances plutôt que d'autres.

En retenant l'approche de R. Thom [Thom 1988 op. cité], on considère, sur l'ensemble des formes saillantes du monde, la relation "*renvoie symboliquement*". Pour deux formes saillantes F_1 et F_2 , on note :

$$F_2 \rightarrow F_1$$

le fait que la forme F_2 renvoie symboliquement à la forme F_1 . Par exemple, un piétement de poule F_2 renvoie symboliquement à l'objet poule F_1 , pour un individu de type renard, récepteur possible de ces deux formes saillantes.

La relation est non réflexive et transitive, et on peut ainsi considérer des suites de renvois symboliques :

$$F_n \dots \rightarrow F_6 \rightarrow F_5 \rightarrow F_4 \rightarrow F_3 \rightarrow F_2 \rightarrow F_1$$

Chaque saillance origine d'un renvoi est significativement, en tant que réaction physiologique de l'individu, plus faible que la saillance cible. La réaction du renard à un froissement de buisson est faible : c'est de l'attention. Si ce froissement renvoie à une odeur de volaille, son comportement se tend : c'est le but qui se dessine. Et si, de plus, il voit effectivement la proie, alors son comportement bascule de la recherche à l'atteinte : c'est la situation de prise, de capture. On peut donc attacher une fonction de mesure du comportement de l'individu à une séquence de renvois symboliques, qui constitue alors une suite croissante.

Appelons $R(S)$ la mesure de la saillance S de la suite de renvois symboliques. Pour la séquence de renvois symboliques, on a :

$$R(S_n) < R(S_{n-1}) < R(S_2) < R(S_1) < R(S_0)$$

Mais tout individu est soumis, à chaque moment, à certaines prégnances, et il interprète, par ce fait, certaines saillances. Dans notre exemple, le renard peut être soumis à un attracteur qui le conduit à rechercher effectivement une proie quelconque, en inhibant éventuellement une prégnance de conservation

(la prudence dans ce cas). Il interprétera le frôlement dans le buisson comme la présence d'un animal pouvant être une proie, ou un autre prédateur. La précision de son attention sera renforcée par la mise en alerte de son sens olfactif. Cette attention sera encore renforcée par l'odeur de volaille, et son attitude deviendra alors, brusquement, celle du prédateur à l'attaque. On peut donc dire que, sous la domination d'un attracteur de recherche de nourriture, le renard est conduit à remarquer un frôlement de buisson, puis est conduit à rechercher l'odeur de l'animal qui a marqué son passage, avec exhibition de la saillance olfactive. Il sera conduit alors à adopter une attitude d'attaque, si le contexte de l'attaque est possible. Nous dirons que la séquence de renvois symboliques est dénotée par la forme prégnante qui la cause.

Appelons, à la suite de R. Thom, Γ_P la suite de renvois symboliques attachée à la prégnance P. En fait, à une prégnance P, peuvent être attachées de multiples suites de renvois symboliques, non indépendantes. Thom considère la saillance particulière S de la suite Γ_P relative à la prégnance P et qui ne renvoie plus sur aucune saillance. Il appelle cette saillance la source de la prégnance. Si, pour de multiples suites de renvois symboliques relatives à la même prégnance P, c'est la saillance S qui est l'unique source, alors la prégnance P est appelée *prégnance individuante* de la saillance source S. On parlera alors des traits saillants de cette prégnance individuante, comme des suites de renvois symboliques qui dérivent de S par P.

Ce modèle d'appréhension des formes de l'environnement par un individu quelconque s'appuie sur une description linéaire par partie des séquences de formes symboliques perçues, les suites de renvois symboliques formant en réalité des forêts d'arbres n-aires. Elle se prête ainsi fort bien à la transposition dans le domaine des systèmes artificiels. Mais elle présente une limitation pour représenter l'émergence du sens dans un système, qui est un processus typiquement non linéaire [Cardon 1999].

Interprétation des saillances et des prégnances

On peut considérer qu'un système artificiel est soumis à des stimuli correspondant à la préhension de formes de deux types : des saillances et des prégnances. Nous avons alors les caractères suivants :

- le système est composé d'entités autonomes en interrelations
- le système est doté d'une représentation de son environnement sous forme d'un système plastique et complexe
- le système perçoit, via les stimuli, des formes soit saillantes soit prégnantes

Pour le système artificiel, une forme saillante est une forme reconnue localement dans son sous-système de représentation. La reconnaissance s'est effectuée par l'action limitée de certaines composantes du système. L'état global du système est une attention spécifique localisée à la forme saillante.

Pour le système artificiel, une forme saillante (prégnante ?) est une forme reconnue globalement par l'activation de toutes les composantes du sous-système de représentation. L'état global du système est ainsi fortement altéré.

Les formes prégnantes déclenchent ainsi une réorganisation significative du sous-système de représentation du système. On peut concevoir deux types de formes prégnantes artificielles :

1. prégnances régulatrices,
2. prégnances orientatoires.

Les prégnances régulatrices ont pour rôle de maintenir le système en état de disponibilité et de fonctionnement normal. Les prégnances orientatoires ont pour rôle de faire tendre l'activation du système, à partir de son système de représentation, vers certains états attractifs spécifiés.

L'approche par la sémiotique organisationnelle

L'approche sémiophysique de formes appréhendables par un individu quelconque est essentiellement descriptive et bien peu prédictive. Il s'agit de décrire sur quoi porte l'activité de l'individu, en définissant des étapes parfaitement formalisées, où des êtres mathématiques permanents représentent bien ce qui se passe : suites de saillances sans cycle, ensemble de prégnances bien distinguées. C'est une approche typiquement géométrique. La forme géométrique est un invariant fondamental, qui vaut à

la fois pour l'extérieur de l'individu et pour l'intérieur de lui-même. En ce sens, l'individu a une représentation de l'espace euclidien et du temps, *a proprio*, dans sa structure. Avec cette propriété, toute forme de l'extérieur peut en tant que telle être considérée comme une représentation interne par une correspondance simple. C'est sur ce point que nous nous distinguerons de l'approche de R. Thom, en précisant que la mise en correspondance est *le* fait central. Nous considérons que la forme n'est pas première, mais que le processus de représentation, premier et central, découvre en les construisant, les représentations externes qui se révèlent être des formes significatives.

Nous avons ainsi proposé une autre approche de la représentation, basée sur une sémiotique organisationnelle, dérivée de la sémiotique triadique de Peirce [Cardon 1999]. Cette approche est typiquement constructiviste et non plus seulement représentationnelle. Elle décrit les calculs qui génèrent l'activation comportementale du système dans son environnement.

On considère l'appréhension d'une forme quelconque de l'environnement comme un processus de construction d'une forme explicite interne, qui fait correspondre à un objet extérieur un signe qui vaut pour l'objet, et qui en est totalement différent. La représentation finale de l'objet externe est la forme dense, qui se construit par processus à partir de formes génératrices multiples : les formes filaires. Le processus de construction, appelée le processus miroir, se réalise sous la contrainte de champs multiples : les attracteurs. Cette approche est typiquement constructiviste, c'est-à-dire calculatoire au sens informatique du terme.

Nous pouvons retenir de commun aux deux approches, le fait que deux types de formes sont nécessairement présentes pour constituer une appréhension d'un phénomène chez un individu quelconque : des formes locales, sans signification explicite, et des formes globales, qui reflètent les tendances de l'individu à la reconnaissance des choses.

Dualité informationnelle dans les systèmes adaptatifs

Un système informatique est un système qui échange de l'information avec son environnement, et on considérera qu'il n'y a échange qu'à ce niveau. On

considère usuellement l'information comme une donnée neutre qui passe de l'environnement au système, dans les deux sens. Cette information, matérialisée sous forme de chaînes de bits, est alors appréhendée au sens de Shannon.

Les systèmes que nous considérons sont des systèmes adaptatifs, c'est-à-dire qui sont soumis à des tendances fondamentales et qui ont une certaine aptitude à concevoir ce qui est à faire d'adéquat pour satisfaire leurs tendances selon les opportunités présentes dans l'environnement.

Préhension pré-conceptuelle

Une préhension pré-conceptuelle de traits de l'environnement est une façon, pour un système dépourvu de sous-système de représentation de l'environnement, de réorganiser ses composants pour se mettre en situation vers l'action la plus opportune face à la situation. Cette réorganisation n'engendre pas de formes significatives, cognitives, dans sa structure sur les aspects de la situation.

Dans une préhension pré-conceptuelle des caractères de l'environnement, il n'y a pas d'acte de signification. C'est le niveau d'un système sans conscience. Par cela, un système adaptatif de cet ordre ne générera pas de sens à propos des choses de l'environnement.

Le système adaptatif est caractérisé par :

- un mécanisme de réception d'informations,
- un mécanisme de restitution d'informations,
- un moyen de préhension pré-conceptuelle de certaines choses du monde environnant à partir des informations reçues, permettant également l'interprétation et le traitement de ces informations sous forme opératoire,
- de plus, il a une capacité à évoluer dans son environnement, en faisant certains plans, même limités.

L'information véhiculée et manipulée par un mécanisme de pré-conception est plus qu'une donnée. Le système sera même dans certains cas construit autour de son processus de pré-conception s'il est particulièrement adaptatif et prédateur sur son environnement. Ce processus de pré-conception manipule des traits locaux, partiels, insuffisants, pour finalement s'organiser selon une forme tendant à l'action la plus adéquate sur l'environnement, en se conformant à ses tendances fondamentales. Le système ne génère pas de

représentation signifiante de l'environnement, mais se réorganise, sous la seule impulsion de ses tendances fondamentales, pour agir de manière adéquate sur l'environnement.

Raison à la réorganisation

Un système minimalement adaptatif est doté d'un mécanisme de pré-conception qui, sous l'impulsion et la conduite de ses tendances fondamentales, lui permet de réorganiser ses composants, pour se mettre en situation d'action particulièrement adaptée par rapport à la situation courante.

De la même façon qu'il y a deux types de formes, des prégnances et des saillances, il y a deux types de flux informationnels dans un système. Il y a, dans la partie représentation du système, un flux informationnel qui est relatif aux prégnances, aux besoins fondamentaux, et un flux informationnel qui est relatif aux saillances, aux choses fonctionnellement définies et limitées en capacité de réorganisation. Ces deux flux se rencontrent et opèrent l'un sur l'autre.

La partie représentation du système, qui construit une représentation d'un certain objet du monde environnant, est soumise, simultanément et à tout instant où elle est active, à ces deux flux.

Le flux informationnel qui est relatif aux saillances, véhicule une information locale, précise, ponctuelle, qui caractérise les objets représentés par des traits constitutifs. On appellera ce flux le flux informationnel factuel, et l'information qui y est relative, *l'information factuelle*.

Le flux informationnel qui est relatif aux prégnances, véhicule une information relative à la réorganisation même du système sous la pression de ses besoins fondamentaux. Cette information caractérise les organisations de constituants du système en train de se constituer, par leurs caractères globaux, par ce qui les rend appréhendables et conforme aux tendances fondamentales. On appellera ce flux le flux informationnel organisationnel, et l'information relative, *l'information organisationnelle*.

Ainsi, circulant dans les deux sens, il y a toujours deux types d'informations que le système adaptatif utilisera.

Le couple informationnel dans un système adaptatif

Le système adaptatif prend des informations sur son environnement. La prise d'informations sur l'environnement, dans le cas général, est réalisée par des capteurs ou bien par une interface dont un utilisateur se sert pour communiquer avec le système. L'utilisateur agit sur le système en réalisant des actions sur son interface. Ces actions, quelle que soit leur forme, sont, pour le système adaptatif, des informations externes qui ont toujours *deux* composantes :

1. une information occurring au niveau de certains composants qui la traitent,
2. une information occurring au niveau de l'organisation du système, et engageant ses tendances fondamentales.

Nous appellerons le couple formé par ces deux types d'information le *couple informationnel du système adaptatif*. Ces deux catégories informationnelles, qui ne sont généralement pas explicites dans les données prises par le système en entrée, sont distinguées par le système lui-même. L'existence de ces deux catégories d'information signifie que toute information venant de l'extérieur du système active certains composants du système, ceux qui filtrent en fait cette information, et active aussi certaines tendances fondamentales avec de l'information organisationnelle.

(à suivre)