



HAL
open science

Les systèmes de connaissances

Jean-Louis Ermine

► **To cite this version:**

Jean-Louis Ermine. Les systèmes de connaissances. Hermes Science Publication. Hermes Science Publication, pp.144, 2000. <hal-00856172>

HAL Id: hal-00856172

<https://hal.science/hal-00856172v1>

Submitted on 30 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Les systèmes de connaissance

Deuxième édition

J-L Ermine

Editions Hermes
1^{ère} édition 1996
2^{ème} édition 2000

Préface à la première édition

Qu'il est étrange, ce pouvoir de l'esprit humain, qui est de comprendre pour agir ou de donner sens aux formes qu'il perçoit pour les transformer intentionnellement. Toute méditation sur les multiples conventions dont se dotent les individus et collectivités pour organiser et gérer leurs connaissances-instruments de compréhension nous invite sans cesse à ce même étonnement : quelle est cette " *capacité de relier des choses séparées* ", la forme et le sens, l'information et la connaissance, le faire et le savoir, que G.B. Vico appelait " l'ingenium " ¹ (en s'étonnant de la difficulté de la langue française à traduire ce mot latin si bien assimilé par l'italien ou l'espagnol), capacité qui va fonder la " *faculté de juger* " (E. Kant ²), de comprendre pour agir, et souvent d'agir pour comprendre ? Question éternelle sans doute, qui ne connaîtra jamais de réponse unique et universelle, mais qui semble se renouveler, et je crois s'enrichir, en se complexifiant par le jeu des recherches et des expériences contemporaines sur l'économie et la gestion des connaissances dans et par les organisations sociales.

On aurait pu craindre que les métaphores de l'Énergétique sur lesquelles se sont construits depuis près de deux siècles les discours des sciences économiques puis des sciences de gestion, ne masquent cette complexité de l'économie de l'information et de la gestion des connaissances : il était si tentant d'interpréter de façon naïve et sommaire la *théorie mathématique de la communication* de C. Shannon (1948), en prétendant que l'information était, comme la matière ou le travail, une grandeur mesurable, soumise aux lois de la conservation et de l'équilibre énergétique; il suffisait pour cela d'oublier que l'unité de quantité d'information que dégagait la théorie, le bit, était une unité sans grandeur que l'on pouvait traiter et gérer en termes énergétiques, comme on le fait apparemment si aisément lorsqu'on veut modéliser les traitements et les transformations de matière et de travail : les modèles de l'économie et de la gestion ne peuvent-ils " s'appliquer " aussi aisément aux " quantités d'information ", qu'on les applique aux quantités de blé ou de watt, pour étudier leur production et leur transformation ? La tentation est et demeure grande d'oublier que l'information ne se détruit pas lorsqu'on la consomme, se multiplie lorsqu'on la partage et se développe lorsqu'on l'échange ! Ce qui permet aux " nouveaux énergéticiens ", qu'ils soient économistes, gestionnaires, ou informaticiens, d'appliquer leurs modèles de l'énergétique aujourd'hui bien rodés par un siècle de bons et loyaux services et par un quasi monopole dans les systèmes d'enseignement.

Mais une des dernières venues de la recherche scientifique, la psychologie cognitive, allait progressivement proposer quelques modèles non énergétiques des transactions de ces artifices que sont les informations-connaissances que génèrent et manipulent à plaisir les êtres humains dans l'élaboration et la manifestation de leurs comportements. Modèles qui gagnèrent vite quelque considération dans les communautés scientifiques, non seulement parce qu'ils se référaient volontiers à une longue tradition culturelle, d'Aristote à C.S. Peirce ou P. Valéry, mais aussi parce que les développements scrupuleux de la psychologie expérimentale leur donnait, depuis les années cinquante, une crédibilité rassurante : les œuvres de J. Piaget et d'H.A. Simon constituent aujourd'hui des repères épistémologiques fondamentaux pour toute recherche sur la cognition naturelle et artificielle, et donc pour toute interprétation des processus de transaction affectant les " systèmes de symboles ", ces artifices par lesquels nous relierons dans l'action la forme et le sens, l'information et la connaissance.

Dès lors, nos exercices de modélisation de la gestion des connaissances ou d'économie de l'information vont pouvoir disposer d'un paradigme alternatif au paradigme énergétique pour se développer : appelons le provisoirement " le paradigme de la cognition " pour le caractériser par référence à l'émergence contemporaine des sciences de la cognition et de la communication. Sans doute faudra-t-il l'affiner pour disposer d'un langage permettant de rendre compte de la complexité irréductible des processus socio-organisationnels de traitement de

¹ G.B. Vico : " La méthode des études de notre temps " dans " La vie de G.B. Vico écrite par lui-même " (1710), Traduction de A. Pons, Ed. Grasset, Paris 1983

² E. Kant : " Critique de la faculté de juger " (1793). Traduction sous la direction de F. Alquié. Ed. Gallimard, Folio. Paris 1985

l'information ou de computation symbolique : on a proposé il y a peu³ de construire un paradigme “ *inforéthique* ” autorisant le “ changement de registre modélisateur ” que l'on recherche (“ l'information est à l'organisation ce que la matière est à l'énergie. Mais cette correspondance est plus complexe encore puisqu'affectée par la capacité de décision **éthique** des acteurs en jeu). Réflexion paradigmatique et épistémique qui reste à poursuivre, sans que son inachèvement compromette la discussion des expériences qui pragmatiquement se poursuivent aujourd'hui : “ *En marchant se construit le chemin* ”. Le célèbre vers d'A. Machado dit parfaitement le projet du livre que nous propose aujourd'hui J.-L. Ermine : à la fois retour d'expérience, méditation épistémique et proposition pédagogique, il nous livre une des premières synthèses dont nous disposons aujourd'hui pour aborder la gestion des connaissances dans et par les organisations sociales. Exercice novateur qui va s'avérer très bienvenu tant par les praticiens (les gestionnaires et les informaticiens qui les assistent) que pour les chercheurs en ingénierie des systèmes d'information, et plus généralement en sciences de l'ingénierie des organisations sociales complexes.

Il faut souhaiter une large audience à cette “ réflexion expérimentale ”, car les enjeux sont aujourd'hui importants : nos technologies de l'information se sont développées depuis cinquante ans pour assurer les fonctions de contrôle de nos organisations sur le mode de la régulation énergétique (ou de la première cybernétique). Il s'agit aujourd'hui de les mettre au service de leur complexe fonction d'intelligence : l'intelligence qui s'exerce et s'exprime par nos fascinants “ systèmes de symboles ” médiatisant nos “ systèmes de connaissances ”, observaient déjà A. Newell et H.A. Simon dans leur célèbre “ Conférence Turing ” de 1975⁴. Un texte fondateur que nous pourrions utilement relire aujourd'hui pour interpréter dans ses multiples dimensions le riche exercice de transformation d'expérience en science que nous propose ici J.-L. Ermine.

J.-L. Le Moigne,
Professeur à l'université Aix-Marseille III
Président de l'Association Européenne du Programme Modélisation
de la Complexité

³ dans J.A. Bartoli et J.-L. Le Moigne (Ed.) : “ Organisation Intelligente et Systèmes d'Information Stratégique ”, Ed. Economica, Paris, 1996. Cf. les deux premiers chapitres.

⁴ A. Newell et H.A. Simon : “ Computer Science as an inquiry : symbol and search ”, Communication of the ACM, March 76, vol. 19 n°3, p. 113-126

Avant-propos

La problématique des systèmes de connaissances

Aborder le problème de la connaissance est une véritable gageure. S'il y a un sujet qui préoccupe l'être humain depuis longtemps, c'est bien celui-là : qu'est ce que la connaissance, comment naît-elle, comment se propage-t-elle, comment se transmet-elle, comment la représenter ?... Les questions à son propos sont innombrables et les angles d'attaque sur ces problèmes extrêmement variés. Les approches sur ces questions peuvent être très diverses, relevant tout à la fois de la philosophie, des sciences humaines, de la biologie, de la physique...

Il n'existe visiblement pas de définition scientifique de la connaissance, mais bizarrement, il existe une sorte de science de la connaissance qui ne se définit d'ailleurs pas comme telle, puisque - modestie scientifique oblige ? - elle regroupe et ménage toutes ses composantes, pour l'instant, il est vrai, assez disparates, dans un conglomérat dénommé "Sciences Cognitives" (le pluriel semble très important). C'est du moins un effort louable de la communauté scientifique pour essayer de faire surgir une problématique commune, qui semble d'ailleurs plus intéresser les philosophes et même l'homme du commun (il s'agit d'un véritable problème de société, qu'on peut ancrer facilement dans le quotidien) que les scientifiques eux-mêmes en général. On a vu ainsi naître dans la fin des années 80 en France, et, ce qui semble assez unique, insufflées du haut de la hiérarchie (ministères, CNRS...) les actions "Sciences de la Cognition", "Cognosciences". Cette dernière a fait en Octobre 92 l'objet d'un numéro spécial du courrier du CNRS qui définit sur sa couverture les Sciences Cognitives comme les "études théoriques et recherches expérimentales [qui] joignent leurs efforts pour comprendre le fonctionnement du cerveau et de l'esprit et concevoir les moyens artificiels pour amplifier les pouvoirs de l'intelligence". C'est dans cette définition qu'il faut inclure le travail qui suit, dont le but n'est pas de rajouter du bruit sur ce qu'on peut encore dire sur ce sujet, mais de donner une approche très particulière de la connaissance en tant qu'elle va être considérée comme un objet d'ingénierie.

L'*ingénierie des connaissances* est une problématique qui est apparue il y a une quinzaine d'années, lorsqu'à la suite de travaux en intelligence artificielle (notamment ce qu'on a appelé les « systèmes experts »), on s'est posé le problème de formaliser des connaissances (en particulier celle des experts) afin de pouvoir réaliser des systèmes informatisés. La connaissance est devenue alors un objet susceptible de traitement automatique, au même titre que les données d'un problème mathématique, ou les informations d'un problème de gestion. La question n'était plus alors d'étudier la connaissance d'un point de vue théorique (et l'on voit la difficulté autant que la richesse de cette question), mais d'élaborer des méthodologies qui permettent de maîtriser de manière opérationnelle la complexité du problème des connaissances dans les organisations diverses (humaines, industrielles...). L'approche de l'ingénierie se veut donc par nature réductrice à la base, tout en restant ambitieuse, dans la mesure où elle cherche à conserver, autant que faire se peut, les aspects complexes qui font la richesse du sujet. Il n'y a donc pas d'objet "connaissance", mais un but. Il ne s'agit donc pas d'un point de vue de type fondamental (science "objective" avec un objet prédéfini), mais d'un point de vue de type "ingénierie" (science "projective" avec un projet précis). Il faut donc définir les moyens qu'elle met en œuvre pour aboutir à son projet, notamment comment elle aborde le problème de la connaissance pour ses besoins propres.

Ces besoins ont beaucoup évolué depuis quelques années, jusqu'au point de changer radicalement le projet même de l'ingénierie des connaissances. Il s'agissait au début de capter l'expertise d'un ou quelques experts, pour la "mettre en boîte" dans un système informatisé. Cela relevait d'une partie (parfois contestée d'ailleurs en tant que telle) des sciences informatiques (à ne pas confondre avec les sciences de l'information !), souvent appelée *intelligence artificielle*, qui met au point les méthodes et techniques, ainsi que les fondements formalisés d'un objet "connaissance" ou "raisonnement" susceptible d'un traitement par ordinateur. Les succès, comme les échecs, de cette approche, qui a sensiblement pénétré les milieux professionnels, sont incontestables.

Mais ces mêmes milieux se sont vus depuis peu confrontés à un problème qu'ils n'avaient pas vu venir. L'introduction de techniques avancées comme l'intelligence artificielle (dont le sigle "IA" peut avantageusement signifier aussi "Informatique Avancée") est, somme toute, anecdotique dans la stratégie de l'entreprise. Le véritable enjeu était, et est toujours, la maîtrise de ce qu'on appelle "l'information". Il n'y a qu'à observer le fabuleux tapage médiatique autour des « nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC)" pour en être convaincu. Depuis donc des décennies, portée par la montée continue et impressionnante - qui ne semble pas vouloir s'arrêter - des moyens dits de "traitement de l'information", se développe une

ingénierie des "*systèmes d'information*" qui est un élément clé des stratégies d'entreprise. C'est effectivement par le biais de ces systèmes d'information que la qualité, la compétitivité, la rentabilité des entreprises se sont nettement améliorées. Pour sortir du domaine purement économique, des enjeux sociaux, au niveau par exemple de l'éducation, des services publics, de la culture, des loisirs... ont pu également bénéficier grandement de ces technologies. Dans l'euphorie du "tout informationnel", on a magnifié la puissance des ordinateurs en oubliant un peu vite qu'à la base de l'information, il y a des êtres humains. Et bien sûr, l'homme est en train de revenir en force dans les nouveaux enjeux économiques et sociaux, et il revient par le biais d'une de ses caractéristiques profondes : la connaissance. Fort de ce que toutes les informations étaient soigneusement stockées dans les bases de données, dans les documents etc., les organisations en étaient venues à oublier qu'elles étaient composées d'êtres humains qui possèdent un cerveau aux ressources incomparablement plus développées qu'un ordinateur, et des capacités de communication qui n'ont rien à voir avec celles d'un fax ou d'un courrier électronique. Tant que ces personnes nourrissaient, faisaient fonctionner les systèmes d'information, leurs rôles semblaient "aller de soi", ils semblaient même à la limite interchangeable. Et puis sont venues les grandes réorganisations industrielles, les arrêts brusques, ou les aboutissements de grands projets technologiques, les plans sociaux, les vagues de départ à la retraite etc. Et l'on s'aperçoit maintenant brutalement que chaque communauté d'êtres humains avait créé dans son organisation une richesse, un patrimoine qui ne se retrouve pas dans toutes les technologies mises en place, et qui s'effiloche progressivement jusqu'à être perdu corps et bien. Il s'agit bien sûr du savoir-faire, de l'expérience, du partage d'une culture commune etc. Qui plus est, les organisations sont à une certaine apogée (relative) dans la maîtrise des technologies et les différences purement techniques entre des firmes concurrentes sont globalement réduites. L'avantage concurrentiel (pour reprendre un terme économique, qui n'est cependant pas ici la seule visée) ne se situe donc plus seulement dans les technologies, qu'elles soient "matérielles" (maîtrise des procédés de fabrication par exemple) ou "immatérielles" (maîtrise des systèmes d'information). Il se situe de plus en plus dans la maîtrise du savoir-faire, du savoir, de la culture d'entreprise..., bref de la connaissance⁵. L'enjeu n'est donc plus de gérer l'information de l'organisation (qu'elle soit industrielle, sociale, politique...), mais de gérer son patrimoine de connaissances. L'ingénierie des connaissances reprend alors tous ses droits et sa légitimité. Mais du coup, « l'objet connaissance », pour autant qu'il peut être appréhendé à travers le projet de l'ingénierie des connaissances, se transforme singulièrement. Il ne s'agit pas de l'expertise isolée d'une ou plusieurs personnes, d'un ensemble d'éléments identifiables à travers des sources d'information (bases de données, livres, documents, logiciels...), mais d'un concept diffus, difficile à cerner, qui n'est pas réductible à une somme d'éléments clairement définis, qui est en interrelation complexe avec tous les agents, tous les systèmes qui participent au(x) projet(s) de l'organisation. C'est pourquoi on parlera désormais ici de "*systèmes de connaissances*" (le mot "connaissances" peut être mis au singulier, pour donner une couleur plus générique, ou faire symétrie avec les systèmes d'information). Ainsi donc, l'objectif de cet ouvrage est d'aborder, à l'instar du système d'information, ce nouvel objet d'ingénierie qu'est le système de connaissances d'une organisation.

L'ingénierie, comme il a déjà été dit, ne se définissant pas à partir d'un objet, mais à partir d'un projet, il convient de retenir un objectif pour cerner ce qu'est un système de connaissances. Cet objectif est maintenant bien connu (?) et s'appelle la *gestion des connaissances*, qu'on entendra au sens de *gestion des systèmes de connaissances*. Depuis la première édition de ce livre en 1996, la notion de gestion des connaissances nous est revenue d'outre-atlantique, sous le vocable de « Knowledge Management », avec une vigueur et une force qui en font un des mots clés des entreprises actuellement. Il est trop tôt pour éliminer le flou autour de ce concept, et nous procéderons par touches composites pour essayer d'en dresser très succinctement un aperçu. On se référera au dernier chapitre de cet ouvrage pour plus de détails et de références.

Le concept clé de la gestion des connaissances est celui de « capital » : la connaissance est considérée désormais comme un capital qui a une valeur économique et un statut stratégique pour l'entreprise, au même titre (et souvent plus) que les actifs tangibles de cette entreprise. La problématique est alors d'identifier les axes stratégiques de valorisation (dans tous les sens du terme) de ce capital, et de mettre en place les moyens, les outils et les méthodes pour atteindre ces objectifs. C'est donc une problématique extrêmement diversifiée, qui touche pratiquement tous les aspects fondamentaux de l'entreprise. C'est d'ailleurs pourquoi certains y voient une nouvelle « révolution » d'une ampleur comparable à la révolution industrielle du XXI^{ème} siècle.

Dans une optique d'ingénierie des connaissances, il s'agit, comme il a été dit au début de cet avant-propos pour les sciences cognitives, de « concevoir les moyens artificiels pour amplifier les pouvoirs de l'intelligence », mais il est question ici d'intelligence collective, qui est plus que la somme de toutes les intelligences individuelles qui la compose. Ces moyens sont à base technologique de manière évidente (les NTIC sont

⁵ Les anglo-saxons parlent de "Corporate Knowledge", et résument notre propos dans cette formule intense "Knowledge is power".

incontournables dans cette optique), mais ils relèvent aussi de méthodologies à dimension industrielle, au même titre que la gestion de production ou la gestion de la qualité.

C'est dans ce cadre que nous avons mené notre réflexion et expérimenté depuis des années au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), et dans de nombreuses industries et organisations. Cette action s'est située dans la continuité d'une pratique déjà ancienne des technologies de la connaissance ([Ermine 89 et 93]). La première édition de ce livre se situait dans une période de construction de l'édifice théorique et méthodologique (incarné dans la méthode MKSM), appuyée par des applications pilotes. Quelques années après, les bases théoriques semblent toujours solides et la méthodologie a atteint un stade de maturité beaucoup plus important, validés sur de nombreux projets opérationnels, parfois de grande envergure. Pour les bases théoriques, une seconde édition est donc encore d'actualité, et un chapitre méthodologique, sur la méthode MKSM, a été rajouté à la fin. Pour le futur proche, la théorie va s'étoffer considérablement en posant des bases pour comprendre l'évolution des connaissances (des systèmes de connaissances) dans les organisations, et déboucher, à l'instar de ce qui s'est fait pour la version initiale de MKSM, sur une nouvelle version qui s'appuiera sur cette théorie et permettra de gérer le patrimoine de connaissances d'une organisation en y intégrant son évolution, incluant les problématiques d'interaction avec les environnements concurrentiels, socio-techniques et scientifiques, de la créativité, de l'innovation etc.

Les éléments théoriques pour la gestion des connaissances

L'objectif de cet ouvrage est de compiler les éléments théoriques qui sous-tendent et justifient une méthode de gestion des connaissances, notamment celle que nous mettons en place, même si la mise en place d'une méthode opérationnelle engendre quelques distorsions ou interprétations ad hoc de la théorie. Une bonne ingénierie des systèmes de connaissances ne peut pas en effet se concevoir en écartant la somme immense de réflexions de toute sorte qui s'est faite sur la connaissance humaine. Il semblerait également vain de vouloir y incorporer l'ensemble de cette réflexion.

Ce que nous exposons donc ici, ce sont les choix théoriques qui ont été faits et qui constituent un crible drastique dans une hypothétique "science de la connaissance". Ces choix sont justifiés par la validation sur les problèmes opérationnels auxquels ils ont été confrontés à travers la susdite méthodologie MKSM. Ils sont donc susceptibles d'évolution, d'enrichissement et de critiques. Ils résultent bien sûr d'autres critères plus pragmatiques comme nos propres connaissances (et notre bibliothèque personnelle) nécessairement limitées (on retrouvera certainement dans ces lignes une origine de mathématicien et une formation d'informaticien), ou notre réseau nécessairement fini de collaborateurs et conseillers.

On pourra remarquer que la plupart des théories utilisées en référence sont des théories "closes", et qui font pour la plupart l'objet d'une remise en cause dans leur domaine propre. Invoquer Chomsky par exemple peut tout au plus arracher un sourire condescendant à un linguiste moderne. Il en va sans doute de même de Piaget pour un psychologue, Lévi-Strauss pour un anthropologue, Freud pour un psychanalyste etc. Mais ces théories ont plus qu'une valeur historique, et l'ingénierie se satisfait justement de théories closes, dont on connaît les limites et les insuffisances. Pour répéter ce qui est dit au chapitre 2, l'exemple révélateur est celui de la linguistique de Chomsky des années 50 qui est toujours fondamentale dans la théorie moderne des langages informatiques et qui se porte beaucoup moins bien dans les théories linguistiques actuelles. A charge donc aux différents théoriciens de fournir les nouveaux éléments qui rempliront le même rôle dans le futur.

L'approche retenue pour l'exposé se veut pédagogique. L'idée du début est d'écrire un livre "pour les piétons", même si, au vu du résultat, on s'aperçoit qu'il faut tout de même être un bon randonneur ! C'est pourquoi on a choisi un exemple unique de la vie courante, décliné tout au long des chapitres : celui du système des feux de circulation. Ceci nous a d'ailleurs permis de découvrir le gouffre insondable, tout autant que la richesse d'un exemple a priori si banal ! Ce n'est pas qu'un exemple d'école, même s'il a fallu parfois le forcer quelque peu, et le lecteur peut nous faire confiance : les problèmes sont du même niveau (à la taille près) quand il s'agit de la conduite d'une centrale nucléaire, du test d'un médicament, ou de la conception d'un système technique complexe.

Introduction aux systèmes de connaissances

Le microscope et le microscope

Confronté au problème de la connaissance dans une organisation, (ayons par exemple en tête un service d'une entreprise, plutôt que l'ensemble d'une grosse organisation), surtout quand il s'agit d'en organiser la gestion, on peut être légitimement pris de vertige devant la complexité du problème. Complexité due au nombre des agents, humains ou non, intervenant dans la réalisation des objectifs, à la complexité de leurs interrelations, à la multiplicité des sources d'information participant au processus, aux connaissances intervenant dans la résolution

des problèmes, au non-dit d'un certain nombre de procédures, au savoir tacite ou implicite nécessaire à l'application de certaines tâches etc. Il est donc clair qu'on est en face d'un *système complexe*, dans un sens qui est maintenant largement répandu [Morin 90].

Face à cette complexité, il est tentant de réduire le problème à un problème plus simple, et de traiter "au moins celui-là", d'autant plus s'il existe des outils disponibles qui font très bien ce travail. C'est ce qu'on appelle familièrement "prendre le problème par le petit bout de la lorgnette", qui oblige à restreindre, voire à mutiler la vision qu'on a du système. C'est ce qui se passe la plupart du temps avec un système de connaissances. La tentation est forte de réduire le problème en disant : "faisons une base de données, rédigeons une documentation, organisons des formations, programmons un système expert etc.", ce qui aboutit inévitablement à laisser ce côté une partie de la connaissance, qui pourrait bien, hélas, se révéler stratégique ultérieurement. Ce "petit bout de la lorgnette" nous rappelle la métaphore, optique elle aussi, du microscope de Claude Lévi-Strauss, qui sera utilisée à deux reprises dans ce livre : on ne maîtrise qu'un point de vue partiel du système "comme cela se produit avec le microscope optique, incapable de révéler à l'observateur la structure ultime de la matière, on a seulement le choix entre plusieurs grossissements : chacun rend manifeste un niveau d'organisation dont la vérité n'est que relative, et exclut tant qu'on l'adopte la perception des autres niveaux" ([Lévi-Strauss] 64, Ouverture I). On peut choisir son niveau de grossissement, on y découvre une organisation, une "vérité" toute relative, qui ignore celle des autres niveaux.

Il y a deux choses importantes dans la métaphore du microscope. La première est qu'effectivement, l'observation d'un niveau exclut la vision d'autres niveaux. La seconde est que l'observation d'un niveau y fait découvrir une organisation qu'on ne voyait pas auparavant, et qui entretient ensuite l'illusion que cette organisation, parce qu'on l'a découverte (souvent avec bien des efforts), est la clé de la maîtrise du système. La première attitude est culturelle, puisque la méthode analytique qui règne en maître depuis des siècles sur nos cultures nous enseigne qu'il faut réduire un problème pour pouvoir le résoudre, la seconde est plus d'ordre économique (intellectuelle ou financière), puisque découvrir l'organisation même d'un seul point de vue du système est un effort important, dont le résultat est fascinant et comble assez aisément l'esprit (tout en épuisant les budgets !), ce qui ne met pas en avant la nécessité d'aller explorer d'autres chemins.

Dans un tel constat, rien ni personne n'est à blâmer, et les résultats de telles approches sont également loin d'être inconséquents. Mais quand on aborde la problématique de la gestion des connaissances, on touche là leurs limites. La question est bien sûr : peut-on faire autrement ? La réponse n'est pas nouvelle non plus, et se traduit par une autre métaphore, qui nous est fournie par Joël de Rosnay, la métaphore du *macroscope*, qui prend justement le contre-pied de celle du microscope.

L'idée du microscope, comme celle du télescope qui n'a pas été évoquée jusqu'ici, est celle d'instruments qui permettent d'aller au delà de la perception humaine, et de révéler des organisations, des structures qui ne sont pas a priori visibles avec les moyens classiques. Ce sont donc des instruments très puissants d'acquisition de connaissances, qui ont d'ailleurs largement prouvé leur efficacité. Leur puissance métaphorique est donc évidente. Mais celle-ci cache un biais. Car à travers l'inconnu de l'infiniment petit, ou l'infiniment grand dont elle ouvre les portes, elle cache une autre ignorance, celle d'une autre dimension, tout aussi mystérieuse et inexplorée, celle que les systémiciens, et notamment J. de Rosnay, appellent celle de l'infiniment complexe. Et le savoir, la science aujourd'hui, pour tout dire l'être humain dans ses interrogations fondamentales, se heurte à ce nouvel obstacle qu'est celui de la complexité.

Il s'agit donc d'inventer un nouvel outil, qui, à l'image du microscope ou du télescope, nous permette d'explorer et de découvrir, de manière féconde et pertinente, les systèmes, dans cette nouvelle dimension de l'infiniment complexe, qui nous permette d'avoir une vision globale des systèmes, non réductrice, et qui nous sorte de l'inférieur continuum dichotomique infiniment petit/infiniment grand. Le changement est de taille, car il ne s'agit certainement pas d'un outil physique ou matériel, au contraire. "Le macroscope n'est pas un outil comme les autres. C'est un instrument symbolique, fait d'un ensemble de méthodes et de techniques empruntées à des disciplines très différentes [...]. Il ne sert pas à voir plus gros ou plus loin. Mais à observer ce qui est *à la fois* trop grand, trop lent et trop complexe pour nos yeux. [De Rosnay 75]".

L'espoir renaît donc, et l'on peut imaginer, si on dispose d'un tel outil, observer (et maîtriser, c'est-à-dire gérer) les systèmes sans les réduire ou les mutiler, et notamment les systèmes de connaissances. C'est ce que nous allons tenter de faire ici. Nous allons tenter de définir un macroscope pour l'observation et la maîtrise des systèmes complexes, et surtout décliner ce macroscope sous le point de vue qui nous intéresse : les systèmes de connaissances.

Les points de vue de la modélisation d'un système

Le triangle sémiotique

La première hypothèse forte qu'on formulera ici est qu'un système (de connaissances, pour le moins), un "phénomène", est perçu par nous tous comme un ensemble global d'éléments, abstraits, concrets, conceptuels, matériels etc., qui, même si nous avons du mal à les distinguer ou les interpréter donnent un sens, une signification, une cohésion intrinsèque au système. C'est la perception globale de ces éléments qui nous fait dire - ou nous fera dire si nous y réfléchissons plus avant - qu'il existe bien quelque chose susceptible d'observation, voire de modélisation, que nous ne connaissons pas encore, que nous ne pouvons peut-être même pas nommer pour le moment. C'est l'hypothèse sémiotique : ces éléments sont désignés sous le terme général de signes, et donc un système (de connaissances) est perçu comme un *système de signes*.

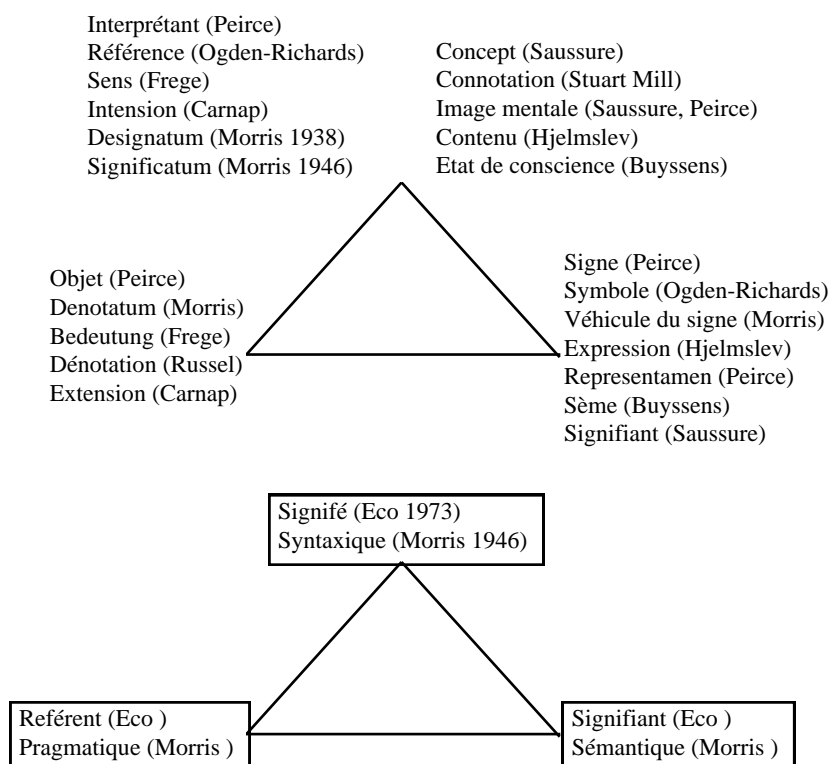


Figure 1 : Catégories notionnelles utilisées par les différents classificateurs dans le triangle sémiotique (d'après Umberto Eco)

Cette hypothèse ne coûte pas bien cher si on ne cherche pas à définir ce qu'est la nature d'un *signe*. En fait, le problème n'est pas nouveau (il remonte à Platon et Aristote) et il est immense ! Il n'est pas dans notre intention d'y revenir (on pourra en voir quelques éléments au chapitre 2). On n'esquissera que le fondement de la théorie du signe, qui a été étudié et formulé sous de multiples aspects et vocables à travers les âges, et qui est une base raisonnable reconnue par tous. Tout phénomène perceptible (signe) s'observe selon trois niveaux indissociables : le référent ou signe (la manifestation), le signifié (la désignation), le signifiant (le sens) ou encore se perçoit selon trois dimensions : syntaxique, sémantique, pragmatique. Cette conjonction de points de vue est inséparable, "on ne peut pas [...] manipuler un symbole en faisant comme s'il n'était qu'un signe dénué a priori de signification et de configurabilité" [Le Moigne 90].

Ainsi donc, tout système doit être vu comme la conjonction de trois points de vue inextricablement liés. Ces trois points de vue ont été nommés de bien des façons (cf. [Eco 88], qui nous fournit le tableau récapitulatif

de la figure 1), pour notre part, nous retiendrons trois termes, (ce choix n'étant, pour nous, qu'une convention terminologique et pas une profession de foi !) : syntaxique, sémantique et pragmatique qui se représentent dans un triangle, le triangle sémiotique, parfois appelé triangle d'Ogden-Richards (figure 2)

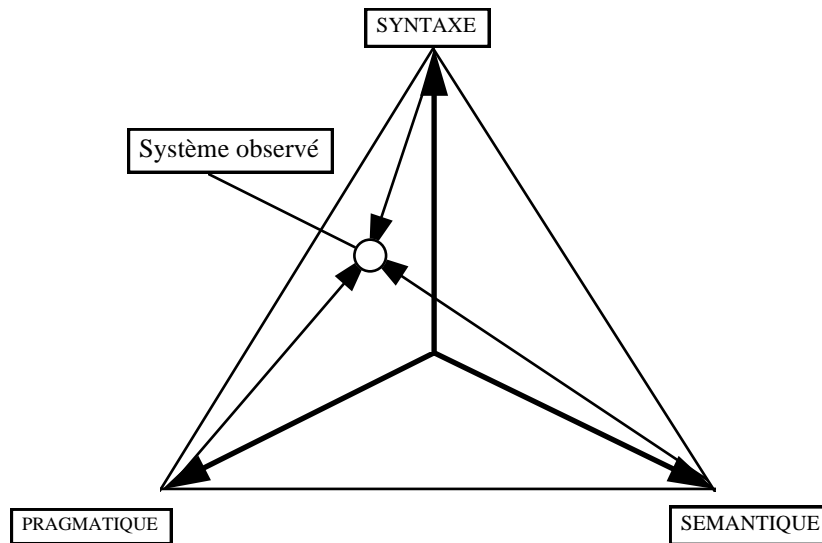


Figure 2 : *Les trois axes du triangle sémiotique*

Le triangle systémique

La seconde hypothèse forte qu'on formulera ici est qu'un système (de connaissances) est un *système* (pardon pour la tautologie apparente !), au sens de la théorie du système général, popularisé en France par le célèbre ouvrage de Jean-Louis Le Moigne [Le Moigne 77]. Là encore, on ne reprendra pas la discussion sur ce qu'est un système, discussion sûrement encore ouverte et tellement "complexe" qu'on peut se demander s'il est possible, dans ces domaines de prendre nécessairement la démarche de "la définition d'abord" ! Nous adopterons la définition "triviale mais mnémonique" de J.-L. Le Moigne dans son chapitre 2 : " en acceptant une définition passe-partout du mot objet, [un système se définit comme] un objet *actif* et *stable* et *évoluant* dans un *environnement*, et par rapport à quelque *finalité*". Bien entendu, si on lit cette définition pour la première fois en s'étant très peu penché sur la question, il n'y a rien là que de très banal. C'est cependant cette vision qui va nous emmener bien loin, tout au long de notre réflexion.

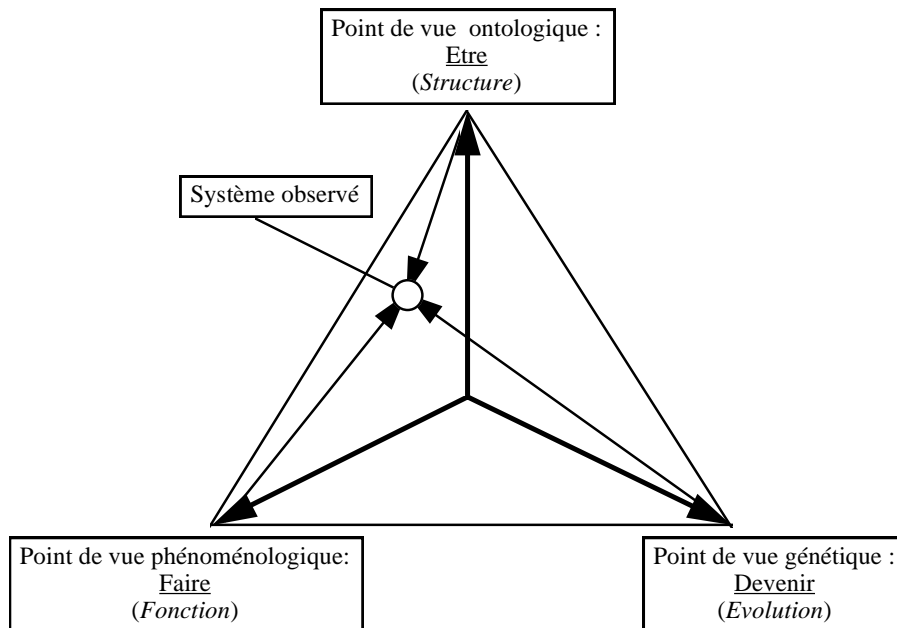


Figure 3 : Les trois axes du triangle systémique

Cette définition du système général aboutit, comme pour la sémiotique, à une "triangulation"(figure 3). Un système s'observe selon trois points de vue indissociables. Là encore, les mots retenus pour désigner ces trois aspects sont variés, et dépendent des connotations qu'on veut y mettre. Un premier point de vue dit *ontologique*, considère le système dans sa *structure*, en tant qu'il est perçu comme un ensemble d'objets agencés, comme "quelque chose", c'est le point de vue de l'*être* du système. Un second point de vue dit *phénoménologique* (ou *fonctionnel*), considère le système dans sa *fonction*, en tant qu'il est perçu comme agissant, comme "faisant quelque chose", c'est le point de vue du *faire* du système. Un troisième point de vue dit *génétique*, considère le système dans son *évolution*, en tant qu'il est perçu comme se modifiant au cours du temps en accord avec son projet, c'est le point de vue du *devenir* du système. Là encore, on choisira par convention la terminologie : ontologique, phénoménologique et génétique.

La perception, l'étude, la modélisation d'un système se fait donc à travers un choix pondéré entre ces trois points de vue. Que ce choix soit dû au hasard, à l'aveuglement, à une réflexion profonde est le vrai problème. Actuellement, il semble que seul un consensus, plus ou moins implicite, entre les acteurs du savoir (y compris ceux qui participent à sa gestion), détermine ce choix et assure la cohésion (et non la cohérence) du système perçu. Ceci est également vrai pour les trois points de vue sémiotiques.

La structure d'analyse d'un système

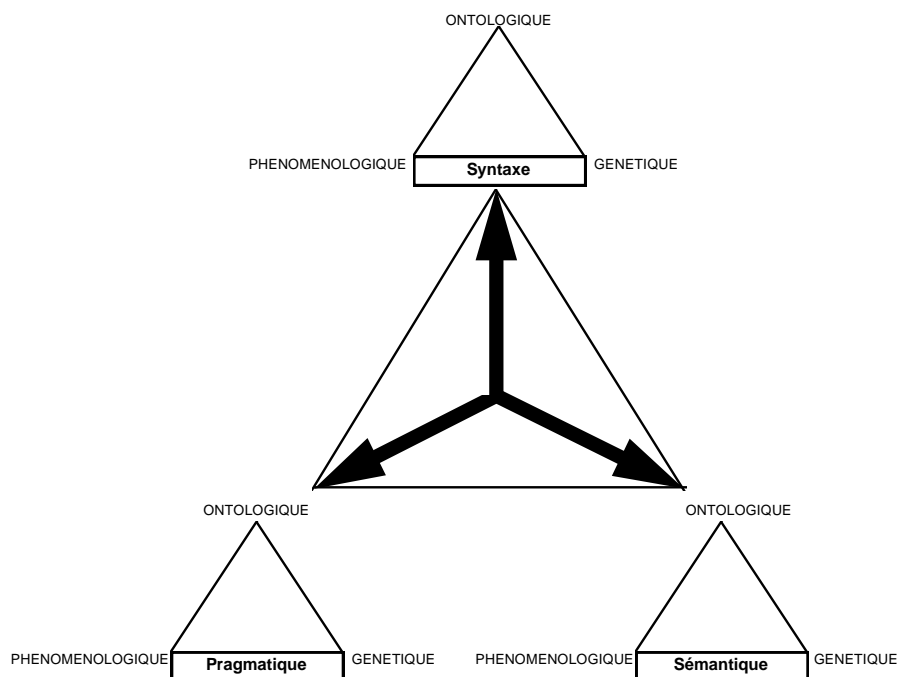


Figure 4 : *Les neuf points de vue sur un système*

La dernière hypothèse qu'on formulera découle directement des deux premières, et fournit le microscope qui permet d'appréhender globalement un phénomène (un système). Puisqu'un système est perçu comme un système de signes et comme un système général, avec chacun trois points de vue, la perception globale qu'on peut avoir est le produit de ces deux types d'approche, qui fournit donc neuf points de vue possibles, agencés comme l'indique la figure 4 : un point de vue syntaxique, sémantique et pragmatique, chacun étant décomposé en trois autres points de vue : ontologique, phénoménologique et génétique. Cet ensemble de neuf points de vue sera considéré désormais comme notre microscope permettant d'aborder, voire de maîtriser, la complexité des systèmes que nous aurons à étudier et gérer.

C'est cette décomposition d'un système en neuf points de vue qui est la base de la réflexion qui suit. Il reste, avant d'aborder le détail des points de vue, à décliner le microscope pour fournir une vision spécifique des systèmes de connaissances tels qu'ils ont été abordés dans l'avant-propos. Le microscope de la connaissance est donc cet outil méthodologique qui permet de définir et d'aborder la connaissance sous l'aspect syntaxique, sémantique et pragmatique, avec chacun trois visions différentes et complémentaires.

Le microscope de la connaissance

Information, signification, contexte

Par rapport aux systèmes complexes généraux dont on a défini un microscope ci-dessus, il reste à faire les hypothèses qui permettent d'interpréter et d'adapter ce microscope à la problématique assignée, à savoir celle de la connaissance.

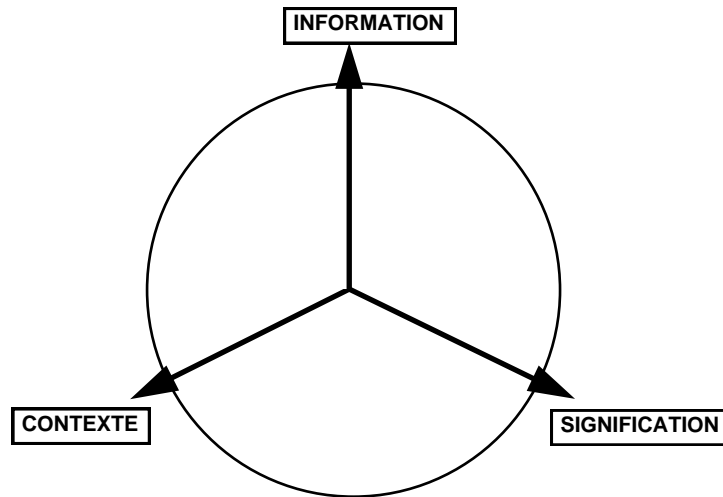


Figure 5 : Les trois axes de la connaissance

La première hypothèse est que l'aspect syntaxique de la connaissance concerne l'information. Le terme information est tellement utilisé, usé, galvaudé, qu'il faudra sans doute arriver à la fin de ce livre pour préciser ce qu'on entend par là. Disons grossièrement que l'information concerne la partie visible, la mise en forme de la connaissance, au même titre que l'orthographe ou la grammaire concernent la partie visible du langage. C'est donc le point de vue qui s'occupe de la forme sous laquelle se traduit la connaissance, du code qu'elle utilise pour *prendre forme*.

La seconde hypothèse est que l'aspect sémantique de la connaissance concerne la signification de l'information, qui est bien évidemment distincte de sa forme, de même que dans le langage, le sens d'une phrase ne dépend pas (ou pas uniquement) de sa syntaxe (rappelons nous le fameux exemple de Chomsky de la phrase : "d'incolores idées vertes dorment furieusement" qui a une syntaxe tout ce qu'il y a de plus correct sans avoir de sens). Il ne suffit pas d'accumuler des données sur une connaissance, encore faut-il y adjoindre d'une manière ou d'une autre, le sens de ces données pour obtenir quelque chose un tant soit peu pertinent. L'accumulation d'information (au sens brut), ne fait pas plus de la connaissance que l'accumulation de briques ne fait un mur ! C'est donc ce point de vue qui s'occupe du fond par rapport à la forme de la connaissance, de la structure qu'elle utilise pour *prendre sens*.

La troisième hypothèse est que l'aspect pragmatique de la connaissance concerne le contexte dans lequel le sens dont on vient de parler se met en place, et qui, comme on le devine aisément, influe fortement sur cette composante. Une connaissance n'existe pas seulement parce qu'elle a une forme et une signification donnée, mais aussi parce que cette forme et cette signification sont données dans un milieu qui lui donne sa richesse et sa pertinence. C'est donc ce point de vue qui s'occupe du système, de l'environnement que la connaissance utilise pour *se mettre en contexte*.

Un système de connaissances est donc vu, à travers notre microscope, comme de l'*information* qui prend une certaine *signification* dans un *contexte* donné (figure 5). C'est cette vision qui sera étayée tout au long de cet ouvrage, dont le découpage suit les différents points de vue évoqués :

Connaissance et information

La définition précise, mathématique de l'information existe. Elle a été donnée par Shannon en 1949, et constitue ce qu'on appelle la théorie de l'information. Inutile donc de tergiverser sur les multiples sens, populaires ou philosophiques, qui ont été donnés à ce mot, il suffit de se baser sur cette théorie, qui comme on le verra, a énormément influencé toutes les théories modernes sur tous les aspects de la connaissance. La théorie de Shannon fournit donc aisément ce qu'on a appelé l'aspect ontologique de l'information. Elle fournit une définition formelle, quantifiée du code qu'utilise la connaissance pour se mettre sous forme de *données informationnelles* (on utilisera le terme simplifié de *données*, malheureusement lui aussi très connoté). Elle est également une base de discussion et de réflexion très forte qui est l'objet du chapitre 1. L'aspect phénoménologique de l'information concerne le *traitement de l'information*, (parfois synonyme d'informatique), qui est un domaine scientifique très développé. Il décrit comment on peut manipuler les données

informationnelles, et est l'objet du chapitre 4. On verra que les aspects ontologiques et phénoménologiques de l'information sont en parfaite dualité.

Connaissance et signification

La signification aborde le problème du sens. L'aspect ontologique s'attache à définir la nature du sens. Vaste programme, qui emprunte à la linguistique, la psychologie cognitive, l'anthropologie, car le sens est profondément enraciné dans l'être humain et sa culture. Il se traduit par des *structures sémantiques* (des données sémantiques, par opposition aux données informationnelles) qui se construisent et se pérennisent dans les structures mentales de l'homme. Ce point de vue est abordé dans le chapitre 2. L'aspect phénoménologique aborde le traitement des données sémantiques. Les structures sémantiques n'existent pas dans l'abstrait, elles sont construites parce qu'elles doivent être utilisées dans un certain but, dans une certaine action. Cette action est caractérisée par un problème à résoudre, un objectif, et est décrite par une stratégie construite par l'esprit humain afin de résoudre ce problème. C'est pour cela que les données sémantiques sont utilisées par des *tâches cognitives* (on utilisera là encore le terme simplifié de *tâches*), qui sont des méthodes de résolution de problèmes, elles aussi construites et pérennisées dans les structures mentales de l'homme. Ces tâches sont l'objet du chapitre 5.

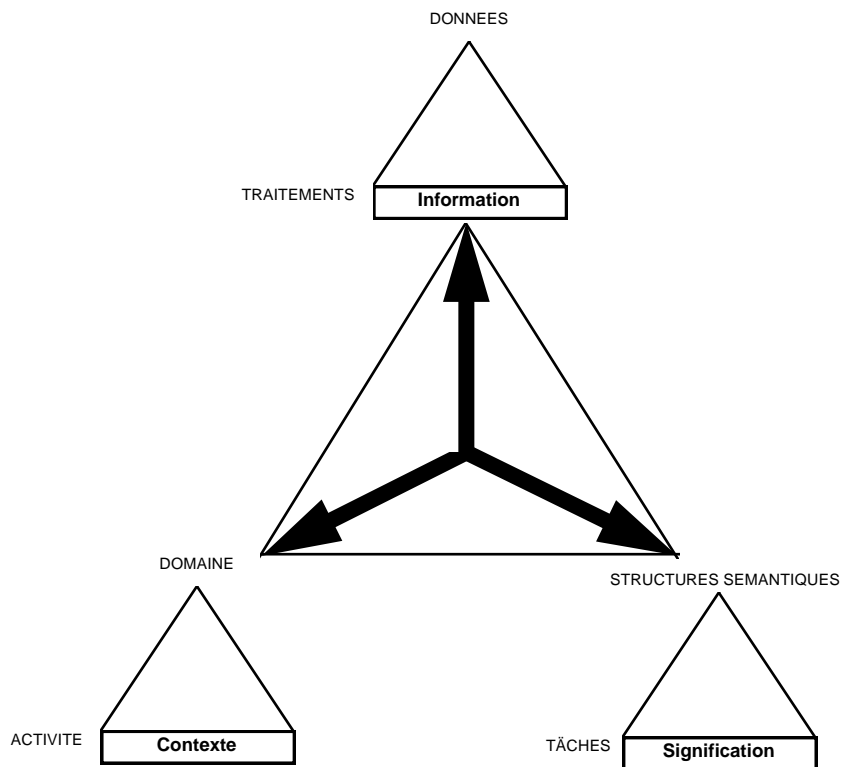


Figure 6 : *Le macroscopie de la connaissance*

Connaissance et contexte

Le contexte aborde la connaissance en tant qu'elle est intégrée à un système, au sens du système général. Il convient alors de représenter ce système pour mettre la connaissance en contexte. L'aspect ontologique du contexte concerne le *domaine* de la connaissance. Pour en avoir une vision globale, le domaine est représenté intégré au système de production de connaissances, puis comme un système général "tapissé de processus". C'est cet ensemble de processus identifiés qui permet de définir une ontologie raisonnée du domaine. C'est l'objet du chapitre 3. L'aspect phénoménologique du contexte est une étude fonctionnelle du système de connaissances. Il consiste à identifier ou définir les *activités* qu'il contient et leurs liaisons en termes d'échanges (de données le plus souvent). C'est l'objet du chapitre 6.

On remarquera une absence de taille dans ce qui vient d'être décrit, c'est la composante génétique de la connaissance. C'est effectivement un grave manque, qui n'avait, à l'époque de la première édition de ce livre,

pas d'éléments de réponse, et pour cause ! Le problème s'est avéré relevant d'une théorie à construire sur l'évolution de la connaissance vue comme un système, à l'instar de la théorie(ou des théories !) évolutionniste des systèmes vivants (ou même artificiels). C'est un travail considérable, et nous n'avons pas de pistes à l'époque, ni d'éléments d'expérience. C'est chose faite maintenant, mais il reste à capitaliser cet ensemble et à le stabiliser. C'est donc encore un travail conséquent qu'il reste à faire et qui de toute façon ne tiendrait pas dans cet ouvrage. Quelques éléments, essentiellement méthodologiques, seront évoqués dans le dernier chapitre.

Une épistémologie de la connaissance

La vision de la connaissance à travers le macroscopie et ses trois axes, information, signification et contexte, permet de délimiter un ensemble de sciences et de méthodes qui relèvent de l'étude d'un système de connaissances. Chacune d'elles s'organise plus particulièrement autour d'un axe donné, de sorte à couvrir, en une sorte de continuum, le cercle du macroscopie. On esquisse ainsi, progressivement, les contours d'une épistémologie nouvelle qui serait celle de la connaissance.

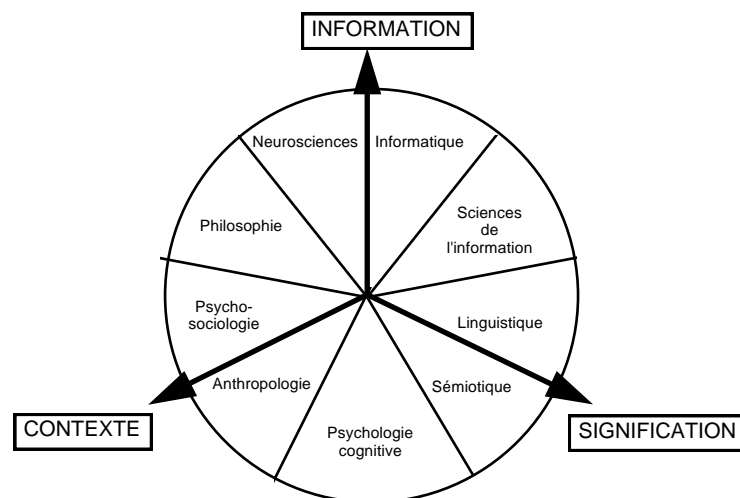


Figure 7 : *Une épistémologie possible de la connaissance*

En partant de l'axe vertical de l'information on peut distinguer :

*) *L'informatique* qui est la science même de l'information et de son traitement (qu'il ne faut pas identifier à ce que les anglo-saxons désignent par l'expression - assez malheureuse - de "computer science"), et qui a pris une importance (trop?) considérable ces dernières années au point d'occulter un certain nombre de problèmes relevant des autres axes du macroscopie. C'est elle qui est en charge des méthodes et outils qui permettent d'enregistrer, mémoriser et mettre à disposition les données informationnelles collectées dans un système où circulent des connaissances. Il est inutile de préciser, dans une telle présentation, qu'elle s'intéresse assez peu aux aspects sémantiques et pragmatiques qui nous préoccupent.

*) *Les sciences de l'information*. C'est ainsi qu'on désigne (du moins dans la classification universitaire française) les disciplines qui ont en charge de sélectionner, d'organiser et de distribuer l'information, à travers des réseaux divers, des bibliothèques, des documentations, des médias multiples et hétérogènes etc. Leur matière brute est donc l'information qui est fournie en grande partie par l'informatique (au sens large). Elles se posent en gestionnaires de l'information, et peu en interpréteur sémantique ou pragmatique de cette information (bien que cette tendance soit beaucoup plus nette ces derniers temps, et pour cause !).

*) *La linguistique*. Elle part de l'information brute qu'est le langage, parlé ou écrit, et interprète son code pour en tirer un sens. C'est une des premières disciplines qui se pose profondément le problème du sens, de sa constitution et de sa structuration.

*) *La sémiotique*. Elle constitue en quelque sorte une généralisation de la linguistique, où le langage est considéré comme un code particulier parmi d'autres. Pour elle, tout est signe et est susceptible d'une interprétation sémantique.

*) *L'anthropologie*⁶. C'est une science de l'homme qui s'intéresse ou reconstruit la sémantique des signes dans un système humain à partir de structures propres à la culture, à la structure de ce système. C'est donc déjà un lien entre la sémantique (structurale) et le contexte du système dans lequel elle est développée.

*) *La psychosociologie*⁷. Cet ensemble de disciplines se préoccupe essentiellement de l'interprétation des phénomènes cognitifs ou psychologiques dans des contextes complexes, et cherche à en maîtriser l'apparition ou le développement. C'est indéniablement l'axe contextuel qui est prioritaire dans cette approche.

*) *La philosophie*. C'est elle qui manifestement a posé la première le problème de la nature de la connaissance, et le dernier mot (si tant est qu'il existe) lui appartiendra sans doute. Cependant c'est un long cheminement pour en arriver aux questions fondamentales qu'elle pose, et il faut avouer que notre avancée dans ce domaine est encore bien faible pour que oser formuler un avis plus pertinent !

*) *Les neurosciences*. Très en vogue actuellement, elles s'intéressent directement à la naissance de la connaissance dans les structures neurocognitives de l'être humain. Elles sont donc à la source de notre problématique, avant même que la connaissance se soit réellement organisée en système. Il semble pour l'instant qu'elles se soient préoccupées essentiellement des données informationnelles, débouchant éventuellement sur des représentations symboliques qui peuvent s'engendrer dans des processus cognitifs. Elles bouclent ainsi clairement le cercle du macroscopique, en se reliant directement sur les sciences du traitement de l'information.

⁶ On entend plutôt l'anthropologie structurale, dans la lignée de C. Lévi-Strauss.

⁷ C'est par ce terme, il est vrai trop général, qu'on entend le courant psychologique et psychiatrique qui tend à remettre les attendus psychologiques dans un contexte relationnel systémique, que ce soit avec les autres (exemple de l'école de Palo Alto) ou avec un artefact ou tout autre système (sociologie de la connaissance...).

Chapitre 1

Connaissance et information

Aspects structurels

1.1. Introduction

Une des questions qui est le plus souvent posée dans l'exercice de nos activités est : "quelle différence y a-t-il entre connaissance et information ?". Cette question est essentielle, à la fois naïve et profonde.

La question posée est naïve, parce qu'elle s'impose aux gens quand ils s'aperçoivent que nos sociétés charrient des flots immenses d'information brute sous toute forme. Information qui échappe au commun des mortels dans sa globalité tellement elle semble complexe à maîtriser, et qui oblige à se rassurer en se disant qu'il y a nécessairement "certaines personnes" qui maîtrisent ce phénomène. L'information n'existe donc pas en tant que telle, elle semble par nature attachée à une fonction plus proche de l'humain, comme le savoir ou le pouvoir, la connaissance ("ceux qui détiennent l'information détiennent le savoir, le pouvoir"). Il en découle une confusion entre l'information et son rôle dans un système : l'information est faite pour comprendre, pour décider, donc l'information est ou contient de la connaissance, l'information est ou contient du pouvoir (et d'ailleurs par transitivité, le savoir est ou contient du pouvoir et vice versa !). Dans une période de pleine euphorie "informationnelle", qui perdure encore avec une certaine vigueur, on a donc cru que l'information était la source de toutes les vertus, et l'on s'est ingénié à l'accumuler, la thésauriser sous toutes ses formes. Tel l'autodidacte de "La nausée" de J.-P. Sartre, qui cherchait à lire systématiquement le plus grand nombre de livres en espérant *savoir*, on a construit des *systèmes d'information* cherchant à gérer le maximum de ces flots informationnels en espérant qu'ils aideraient à savoir et à décider. Et c'est vrai que ces systèmes ont rendu, rendent et rendront de grands services. Mais ils ont également montré leurs limitations : il suffit de considérer les masses d'informations qui sont stockées et disponibles, et d'évaluer leur utilisation réelle pour se rendre compte de la puissance limitée de l'information en tant que telle. Et ce n'est pas la montée en puissance actuelle des machines à traiter l'information qui risque de changer cet état de fait. La confusion première (et naturelle) entre information et connaissance est donc une confusion de surface de type "technologique" qui postule que de la matière naît la fonction, et que le problème essentiel est celui de se donner les moyens de traiter la matière, la fonction se réalisant de manière "naturelle" par la suite.

La question posée est cependant profonde, car le rapport entre information et connaissance n'est pas simple. Il y a une relation essentielle entre les deux notions qui est loin d'être élucidée. Il semble bien qu'une notion d'information existe à part entière. Il est vrai qu'une "information" (disons au sens journalistique du terme) peut être disponible, même si elle est interprétée différemment par chaque destinataire, même si elle débouche sur des actions nécessairement distinctes suivant le contexte où elle existe etc. C'est-à-dire qu'on en arrive à une sorte de paradoxe où une notion essentielle est perçue alors qu'aucune régularité reproductible ne semble se manifester. C'est ainsi qu'on en arrive à se poser le problème de l'existence de l'information en tant qu'objet physique, c'est-à-dire mesurable. Cette recherche est inévitable mais obligatoirement réductrice, et ne peut en tout état de cause, comme il a déjà été souligné, n'apporter qu'un éclairage partiel sur le phénomène de connaissance. Cependant elle est nécessaire. Cette nécessité devenait même urgence vers les années 1940, quand on s'est mis à manipuler techniquement l'information, de manière importante, par sa transmission dans les systèmes de télécommunication. C'est d'ailleurs à un chercheur des laboratoires Bell aux Etats-Unis que l'on doit la théorie dite "de l'information" : Claude Shannon. Destinée au début à des ingénieurs, pour résoudre des problèmes très concrets et techniques (on pourra consulter par exemple les ouvrages spécialisés [Roubine 70] ou [Oswald 86]), cette théorie très mathématique a dépassé rapidement son objectif premier pour envahir le champ de la réflexion sur la nature de l'information et de la communication. Abraham A. Moles, dans sa remarquable préface de l'édition française du livre de Shannon, analyse ce phénomène de *crystallisation de la pensée* qui fait

que l'oeuvre de Shannon a atteint un *seuil intellectuel de célébrité*, passage obligé de toute réflexion sur les processus de communication⁸.

Nous emprunterons donc ce passage qui permettra de voir que si la notion d'information peut se définir et se manipuler clairement (et pas seulement en tant qu'objet mathématique), que si elle entre nécessairement dans la composition de toute connaissance, on aurait cependant tort d'y voir une panacée. On a dépensé beaucoup d'efforts, dans nos sociétés, à engranger et diffuser de l'information sous des formes parfois très sophistiquées, mais souvent, à terme, réductible à une quantité de *bits*, c'est-à-dire une quantité d'information au sens donné par Shannon. Et on le justifie par une pensée héritée de Shannon, de façon souvent incantatoire, sans en apercevoir les contours et les travers. Comme le dit Umberto Eco : " Les principes de la théorie de l'information - exception faite de certains discours spécialisés - sont cités le plus souvent à titre de fétiches ou comme *flatus voci*. Il arrive ainsi que des termes comme "information", "entropie" ou autres soient employés par métaphore. Il nous faut donc les ramener patiemment à leur signification originelle" ([Eco 72] Sec. A, Chap. I, § I.4). C'est ce qu'on va essayer de faire ci-dessous.

1.2. Quelques éléments de la théorie de l'information

1.2.1. Le message et le code

Examinons l'objet "feu de circulation" pour essayer d'élucider quelles sont les connaissances élémentaires qu'il transmet et qui sont utiles dans la conduite automobile. Il importe avant tout de savoir si le feu est au rouge, au vert ou à l'orange. L'information vraiment signifiante est donc donnée par l'état d'une des trois lampes : allumée ou éteinte. Nous recevons de la part d'un feu de circulation des *signaux* que nous sommes capables de comprendre comme des *messages* qu'il nous envoie, par exemple pour des feux d'un premier type, comme ceux qu'on trouve en France : un quand la lampe rouge est allumée (message d'arrêt), un quand la lampe orange est allumée (message de ralentissement) et un quand la lampe verte est allumée (message de passage). Dans des feux d'un second type, le message de ralentissement est remplacé par deux autres messages composites : un quand la lampe verte *et* la lampe orange sont allumées (message de ralentissement), un quand la lampe rouge *et* la lampe orange sont allumées (message de départ) [il existe d'autres systèmes de feux équivalents]. La connaissance fournie par un feu de circulation se traduit donc par seulement trois (ou quatre pour le second type) messages qui sont transmis par l'intermédiaire de signaux lumineux, et que nous pouvons capter grâce à notre système visuel. Ces messages sont récapitulés dans la figure 1.1.

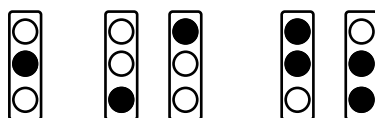


Figure 1.1 : Messages communiqués par un feu de circulation

On peut, à partir de cette constatation, essayer de représenter de manière abstraite les messages transmis par le feu de circulation. Comme il y en a peu, ce n'est pas chose difficile. La manière la plus courante est de représenter les signaux transmis : une lampe éteinte par le chiffre 0, et une lampe allumée par le chiffre 1. L'ensemble des trois lampes, qui constitue le feu de circulation lui même, est ensuite représenté par un nombre à trois chiffres, chacun pouvant prendre la valeur 0 ou 1. Arbitrairement, on supposera que le premier chiffre représente la lampe rouge, le second la lampe orange, le troisième la lampe verte. La représentation abstraite obtenue est récapitulée dans la figure 1.2.

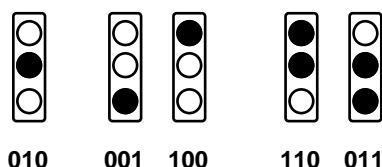


Figure 1.2 : Représentation abstraite des messages du feu de circulation

⁸"[cet ouvrage] a été universellement cité en tête des bibliographies de tous ceux qui de près ou de loin se trouvent touchés à la théorie de l'information, à la fois au titre de caution (et quelquefois d'abri), au titre de rigueur, au titre de référence intellectuelle." [Moles 75].

Ainsi, si l'on considère la connaissance élémentaire qui est fournie par un feu de circulation, on se rend compte qu'elle est assez réduite puisqu'elle peut être représentée par trois ou quatre nombres de trois chiffres. On dit qu'on a *codifié l'information* disponible; cette information est transmise de l'*émetteur*, qui est le feu de circulation, au *récepteur* qui est une personne, qui la reçoit sous forme de *signaux* lumineux via son *canal* visuel. Les nombres, qui sont la représentation abstraite de cette information, forment un *code*, constitué d'informations binaires (0 ou 1) appelés *bits* (condensé de l'expression "binary digits", selon une dénomination proposée par John W. Tukey). On peut ainsi dire que les messages du feu de circulation peuvent se coder sur trois bits.

1.2.2. Bruit et redondance

Après cette première analyse, l'ensemble des messages envoyés par le feu de circulation paraît bien simple, et s'il suffit de trois nombres pour les comprendre, il est bien étonnant qu'on ait choisi des systèmes qui paraissent bien plus compliqués pour transmettre cette information !

La simplicité du système des feux de circulation n'est évidemment qu'apparente, et sa complexité nous apparaîtra bien vite au fur et à mesure. Pour rester dans le champ d'investigation que nous avons commencé à explorer, on peut déjà s'apercevoir que le système n'est pas aussi simpliste qu'il y paraît.

En effet, s'il y a au plus quatre messages à transmettre, on peut imaginer qu'un codage sur deux bits serait suffisant. On disposerait de deux lampes (une rouge, une verte par exemple), le message de passage correspondrait à l'allumage de la lampe verte, celui d'arrêt à l'allumage de la lampe rouge, celui de ralentissement à l'allumage des deux lampes, et éventuellement celui de démarrage à l'extinction des deux lampes. Les codes correspondants sont simples à établir (Figure 1.3).

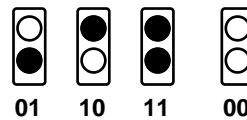


Figure 1.3 : Un autre système de feux de circulation

Pourquoi donc coder sur trois bits ce qu'on peut coder sur deux ? Il est bien sûr qu'en termes de traitement de l'information pure, les deux systèmes proposés sont strictement équivalents. Cependant, on peut rapidement constater que le premier système (codé sur trois bits) est plus intéressant, car plus "robuste". Supposons, en effet, qu'il y ait une coupure d'électricité dans l'alimentation du feu de circulation. Dans le premier système, les trois lampes sont éteintes, et l'information transmise ne correspond donc à aucun message, ce qui n'est pas le cas du second système, où se produit une confusion entre une "non-information" et un message pertinent. La coupure d'électricité s'appelle du *bruit* dans la transmission de l'information. Le premier système est donc plus tolérant au bruit que le second, ceci tient au fait que le code utilisé est plus complexe dans le premier que dans le second.

En fait, les messages communiqués le sont avec des codes bien plus complexes que ce qui a été décrit. Nous n'avons fait pour l'instant qu'expliquer une infime partie des codes qui composent l'information transmise. On peut identifier bien d'autres messages. Par exemple, on peut y ajouter le message des couleurs⁹ (sans parler de sa connotation fortement culturelle), ou, pourquoi pas, le message fourni par les positions des lampes¹⁰. Il n'y a en effet aucune raison que la lampe rouge soit toujours celle du dessus et la verte celle du dessous, si ce n'est, par exemple, pour parer à une éventuelle erreur de quelqu'un qui aurait du mal à distinguer le vert du rouge et qui se repérerait à la position des lampes (un nouveau type de bruit, relatif au canal visuel). Ainsi, il ne faut pas beaucoup de temps pour s'apercevoir que la transmission des messages se fait en général d'une manière extrêmement redondante. La redondance est en fait une caractéristique courante dans les transmissions des messages, et l'on a l'impression que plus le codage est redondant, plus le message est mieux transmis, c'est-à-dire résistant aux bruits. Mais se pose alors la question de savoir où est la limite entre un codage très redondant (qui

⁹ Une couleur peut être codée selon ses trois niveaux de couleurs fondamentales : rouge, vert et bleu (modèle RGB), ou encore suivant ses trois niveaux de brillance, luminosité ou saturation (modèle HLS). Chacun de ces niveaux peut être codé lui-même sous forme binaire, en général sur 16, 24 ou 32 bits. C'est le principe de base de l'infographie.

¹⁰ Il est codable sur trois bits, et c'est en fait celui qui a été utilisé dans les exemples ci dessus, puisqu'on ne dispose pas d'impression en couleur !

transmettrait donc très bien les messages) et un codage trop complexe (qui contiendrait trop d'information difficile à coder et/ou décoder).

1.2.3. Quantité d'information et entropie

Le problème se pose maintenant : pour pouvoir se rendre compte de la qualité d'un message, il faudrait pouvoir estimer la quantité d'information qu'il véhicule, qui rendrait compte de la complexité des codes qui le transmet. Puisque nous avons des moyens formels de coder les messages, peut-on, à partir de là, définir formellement ce qu'est une quantité d'information ?

Il y a plusieurs approches pour essayer d'y arriver. Si l'on se place du point de vue du récepteur, c'est-à-dire de la personne, on peut essayer de déterminer comment reconnaître un message qui est transmis par un feu de circulation.

On peut décrire un processus linéaire et algorithmique, qui n'a sans doute rien à voir avec la réalité, mais qui réalise la fonction désirée. On cherche d'abord à savoir si la première lampe (la lampe rouge) est allumée, pour cela, il faut effectuer un choix binaire, car il y a deux possibilités; supposons que la lampe rouge est éteinte (chemin 1 dans la figure 1.4). On cherche ensuite à savoir si la seconde lampe (la lampe orange) est allumée. Là encore il y a un choix binaire à effectuer. Supposons qu'elle est allumée (chemin 1.1 dans la figure 1.4). Il reste alors un dernier choix binaire pour décoder complètement le message (chemin 1.1.1 ou 1.1.2. Dans tous les cas de figure, l'un de ces messages n'est pas signifiant). Ceci est général, comme on peut s'en apercevoir dans la figure 1.4 : pour arriver à décoder le message reçu (du moins avec la procédure définie ci-dessus), il faudra toujours effectuer trois choix binaires. Ceci est dû au fait qu'on a codé l'ensemble des messages sur trois bits. On dira que la *quantité d'information* contenue dans le message est trois. Cette quantité mesure donc la liberté de choix dont on dispose lorsqu'on décote un message. "En vérité, le mot *information*, dans la théorie de la communication, n'est pas tellement lié à ce que l'on dit, mais plutôt à ce que l'on pourrait dire" ([Weaver 75]).

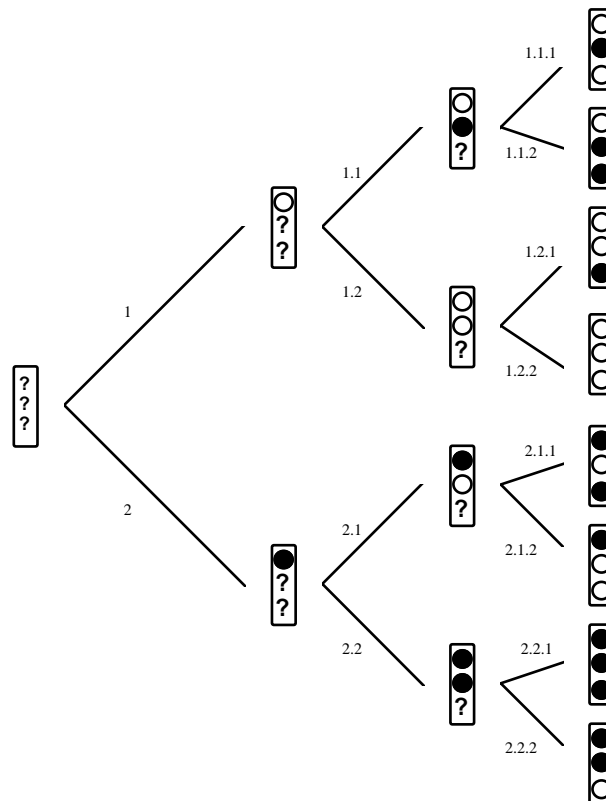


Figure 1.4 : Ensemble des messages possibles d'un feu de circulation

Une autre manière de voir cette quantité d'information est une vision probabiliste, celle qui a fondé la théorie de Claude Shannon ([Shannon 49]). Lors d'une communication, le récepteur est en attente de message :

quand il sait qu'il va regarder un feu de circulation, il a déjà une idée des messages qu'il attend. A priori, il ignore quel message va lui être adressé. Cependant, grâce à son expérience (l'apprentissage du code de la route au minimum, dans ce cas), il s'attend à recevoir certains messages avec des probabilités différentes. Dans le cas décrit ci-dessus, on a fait l'hypothèse que tous les messages qui peuvent être transmis potentiellement par le feu de circulation sont équiprobables, ce qui est bien évidemment faux dans la réalité. Reprenons cependant le calcul fait, quitte à le compliquer plus tard. La probabilité d'apparition d'un message, comme il y en a huit possibles, est $P = 1/8$, mais encore une fois, le codage permet de compter les messages de manière binaire, ce qui correspond à $8 = 2^3$. Pour retrouver la quantité d'information à partir de la probabilité d'un message, il suffit d'une petite formule mathématique qui utilise la fonction logarithme : $3 = -\log_2 (1/2^3)$ d'où la formule générale pour la quantité d'information Q d'un message m dont la probabilité d'occurrence est P : $Q(m) = -\log_2 (P)$.

On voit donc sur cet exemple qu'il y a une relation bijective entre l'incertitude, en termes de probabilité, d'un récepteur, relativement à un message déterminé, et la quantité d'information contenue dans ce message au sens précédent¹¹. On peut maintenant complexifier le modèle, il est bien évident que chaque message possible transmis par le feu de circulation n'a pas la même probabilité d'occurrence, certains ne sont même pas possibles (du moins pas raisonnables !). Par exemple, un modèle raisonnable consiste à attribuer une probabilité égale au feu rouge et au feu vert, et au feu orange. En supposant qu'il tombe souvent en panne (taux de pannes de 4%), les pannes peuvent être partagées entre l'extinction totale (3%) et l'allumage simultané de toutes les lampes - ça s'est déjà vu ! - (1%). Ceci donne un ensemble de messages avec leur probabilité d'occurrence récapitulé dans la figure 1.5.

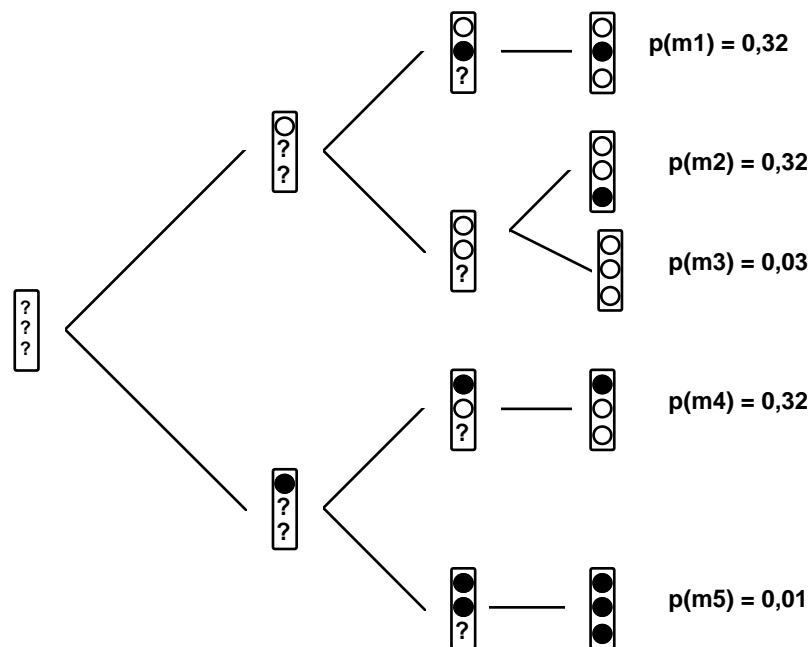


Figure 1.5 : Ensemble de messages probables d'un feu de circulation

La notion de quantité d'information est alors avantageusement remplacée par la notion d'entropie qui est une quantité d'information moyenne au sens des probabilités, moyenne prise sur l'ensemble des messages. Ainsi si p_i désigne la probabilité d'occurrence du message m_i , l'entropie est par définition l'espérance mathématique : $H = -p_1 \log(p_1) - p_2 \log(p_2) - \dots$ (H pour Hartley, qui est un précurseur de Shannon). Dans l'exemple de la figure 1.4, où toutes les probabilités sont égales à $1/8$, on retrouve que l'entropie est égale à $\log(\text{nombre de messages}) = 3$: la moyenne d'information de l'ensemble des messages est égale à l'information d'un message quelconque de l'ensemble. On montre que c'est dans ce cas (tous les messages sont équiprobables) que l'entropie est maximale.

Cette dernière remarque amène un commentaire important. L'entropie est une notion bien connue de la thermodynamique, et le fait que Shannon ait introduit une notion similaire pour quantifier l'information n'est pas

¹¹ "L'incertitude sur un événement [un message] et l'information apportée par la réalisation de cet événement sont des notions équivalentes " ([Roubine 70] Chapitre I §4).

qu'une simple analogie. On a beaucoup discuté sur cette correspondance, et il serait trop long de revenir sur cette discussion. Disons simplement que l'entropie, en thermodynamique, mesure le degré de désordre moléculaire d'un système, que l'entropie maximale correspond à un désordre moléculaire total au sein d'un système, ce qui se manifeste au niveau global par l'équilibre. Au niveau de l'information, l'entropie maximale correspond également à une sorte de "désordre informationnel" total : tous les messages sont équiprobables, et lorsque l'on doit, pour décoder un message, effectuer un choix binaire (utiliser un bit), il n'y a pas plus de raison de s'orienter vers un choix que vers l'autre. Il semble donc y avoir un paradoxe, qui tient plus au vocabulaire qu'au concept : un système qui possède une information maximum (au sens de l'entropie) n'en fournit en fait qu'un minimum. Si les messages ne sont plus équiprobables, donc si l'entropie diminue, le système est plus "informatif"¹². C'est pour cela que l'on parle souvent, à propos de l'information de *néguentropie*, qui est l'inverse de l'entropie. Nous y reviendrons plus loin. L'entropie prend donc le même sens que précédemment, d'information, ou de liberté de choix dans une certaine source, ou encore de moyenne sur les probabilités d'occurrence de l'ensemble des messages. On peut la comparer à la valeur maximum qu'elle pourrait avoir en faisant le rapport entropie/entropie maximale (dans notre cas de figure $H/3$), cette entropie est appelée *entropie relative* h . C'est la différence $1-h$ qui est appelée redondance, et qui mesure la redondance au sens intuitif où elle a été introduite précédemment¹³.

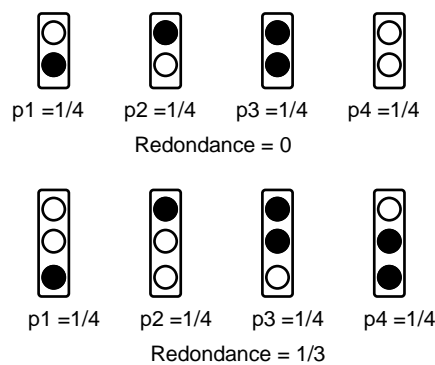


Figure 1.6 : La redondance suivant le codage des messages

Pour donner un exemple, prenons un système de feux de circulation de deuxième type, qu'on peut coder de deux manières différentes, où on supposera pour simplifier que chaque message est équiprobable (Figure 1.6). Dans le cas d'un codage sur deux bits l'entropie est $-p_1 \log(p_1) - p_2 \log(p_2) - p_3 \log(p_3) - p_4 \log(p_4) = \log 4 = 2$, l'entropie maximale est justement égale à 2, donc l'entropie relative à 1 et la redondance est nulle, ce qui n'est pas étonnant puisque le codage est minimum. Dans le cas d'un codage sur trois bits, l'entropie maximale est égale à 3, l'entropie du système est égale à 2, donc l'entropie relative est égale à $2/3$ et la redondance à $1/3$. Le système de codage sur trois feux est donc redondant, nous en avons déjà vu cependant l'intérêt.

1.2.4. Transmission de l'information

La théorie de Shannon nous fournit de très beaux théorèmes, qui sont la base de la théorie et qui explicitent les capacités d'un canal à transmettre un ensemble de messages provenant d'une source d'information. Donnons un exemple, appelé le "premier" théorème de Shannon. La capacité C d'un canal se mesure en bits par seconde. L'entropie H mesure l'information contenue dans un message codé, exprimé en bits par message, le débit d'un canal est mesuré par le rapport C/H exprimé donc en message par seconde. On voit ainsi que le débit dépend du codage des messages. Le résultat de Shannon nous dit que, si l'on suppose qu'il n'y a pas de bruit, on peut toujours trouver un codage des messages tel que le débit est aussi proche que l'on veut de C/H , mais qu'on

¹² "On vérifie intuitivement qu'une dépêche annonçant l'assassinat d'un chef d'état revêt une grande importance, ou contient beaucoup d'information en raison de son improbabilité même, et qu'en revanche le bulletin météorologique qui annoncerait le 30 juin l'absence de chutes de neige le lendemain sur Paris... n'en apporterait rigoureusement aucune" ([Bougnoux 93] Chapitre V).

¹³ On peut par exemple, en utilisant la connaissance sur la fréquence d'apparition des lettres et des mots dans une langue, calculer la redondance du langage : " Il est très intéressant de remarquer que la redondance de l'anglais est de l'ordre de 50%, de sorte que la moitié des lettres ou des mots utilisés pour l'écriture ou la parole dépendent d'un libre choix, et l'autre moitié (bien qu'on l'ignore d'ordinaire) s'établit sous le contrôle de la structure statistique du langage" ([Weaver 75]).

ne peut pas dépasser cette valeur. Seulement, ce théorème n'est pas d'une application aussi simple qu'il y paraît. En effet pour un "gain dans le taux de transmission, il faut payer le prix. Car, fort insidieusement, il se trouve que plus la façon de coder s'approche de l'idéal, plus les délais deviennent longs lors du processus de codage" [Weaver 75]. A l'intérieur même de la théorie apparaît donc un *prix de l'information* pour sa transmission. Nous verrons plus loin d'autres contingences de cet ordre.

Les choses se compliquent quand les messages sont continus dans le temps (parole, musique, image...) - on parle alors de signal continu - et lorsqu'il y a du bruit. Il faut alors prendre des "échantillons" de ce signal à intervalles réguliers; un théorème de la théorie, appelé théorème de Nyquist-Shannon, nous indique la meilleure longueur d'intervalle de temps pour prendre ces échantillons. Ensuite, une formule, dite de Hartley-Shannon-Tuller, nous indique comment calculer par exemple la capacité d'un canal en fonction de ses performances (ce qu'on appelle sa bande passante et son rapport signal/bruit) et de la quantité d'information désirée dans les messages. On entre ici dans une technique qu'il n'est pas nécessaire de pousser plus loin. Elle est évoquée pour montrer que la théorie de l'information (qu'il vaudrait mieux appeler, de manière moins ambiguë, théorie de Shannon) est une théorie très technique, qui s'intéresse à la transmission de messages. Elle repose essentiellement sur un codage abstrait de ces messages et sur les capacités techniques d'un canal à transmettre ces messages sous forme de signaux. Autant dire que cette théorie a beaucoup plus d'applications dans le domaine technologique (qui est son origine) comme les télécommunications, l'audiovisuel etc. que dans des domaines tels que celui de notre exemple des feux de circulation ! Cependant cette théorie a posé (peut-être malgré elle) les bases d'une réflexion pertinente sur la nature profonde de l'information et son apport à un système de connaissances, dont nous allons aborder maintenant quelques aspects.

1.3. L'information : mythes et limites

La théorie de Shannon est, comme nous avons pu l'entrevoir, une théorie très formalisée et par là très séduisante. De très nombreux ouvrages ont été consacrés à son développement formel et de multiples applications ont été et sont encore faites dans de nombreux domaines technologiques. Son succès et son utilité dans ce domaine sont incontestables.

Le caractère mathématique, calculatoire et opérationnel de la théorie a permis de matérialiser et comprendre un concept jusqu'ici insaisissable : l'information. Mais si la mathématique a cette vertu de formaliser des notions de manière indiscutable, elle a à la fois le pouvoir de dessécher un concept d'une richesse inestimable et de faire fantasmer de manière incontrôlée sur une notion qui n'est somme toute que bien banale quand elle se réduit à sa formalisation (ce qui n'enlève d'ailleurs rien au caractère extrêmement novateur et profond des travaux de Shannon).

Cependant, aucune formalisation n'est innocente, ni par sa genèse ni par ses conséquences. Et il est clair que la notion d'information telle qu'elle a été explicitée ici enrichit de manière capitale notre propos. Elle éclaire d'une lumière nouvelle la question de la connaissance humaine. Le problème est de savoir dans quelle limite ! Une des analyses les plus pertinentes de cet apport a été faite sans doute par Edgar Morin, dans le premier tome de "La méthode" : "la Nature de la Nature". Nous allons reprendre ici quelques unes de ses réflexions.

1.3.1. La question du sens

Weaver, dans l'enthousiasme de la découverte de Shannon n'a pas hésité à dire que la théorie de Shannon, si elle n'abordait que le problème technique de la transmission des messages, pouvait être d'un grand secours pour les problèmes sémantiques et même pragmatiques (efficacité sur la conduite du receveur). Et il a commencé à imaginer un "récepteur sémantique" qui soumettrait le message à un second décodage, tenant compte d'un "bruit sémantique" etc. En fait il est clair que la théorie de l'information ne se préoccupe pas de la *signification* des messages, qu'elle ne s'intéresse qu'à leur forme, et qu'il n'y a pas de transfert de sens. Si certains scientifiques ont pensé (naïvement ?) que cette théorie pourrait être complétée par une théorie possible du sens des messages, ce vœu pieu est jusqu'ici resté lettre morte. La sémantique, de plus en plus, explore d'autres voies. "Cela veut dire que le sens fonctionne en dehors de la théorie. La théorie, elle, est *business-like* : elle ne s'intéresse qu'au coût de l'information, tout le reste lui est inutile" ([Morin 77] Part. 3, Chap. 2, § 1)¹⁴. C'est ainsi qu'on peut expliquer, malgré cette carence, son succès dans les communications : l'émetteur et le récepteur savent déjà ce qu'ils veulent communiquer, seule les intéresse la manière de transmettre leur message.

¹⁴ Edgar Morin, pour illustrer son propos, choisit un exemple à la fois émouvant et radical : " Yseult attend le retour de Tristan; elle sait qu'une voile blanche annoncera le retour de son amant, une voile noire sa mort; pour elle les deux branches de cette alternative sont équiprobables [...]. Lorsque de la mer infinie une voile surgira, blanche ou noire, l'observateur shannonien facturera : un bit !" En terme d'information le suicide d'Yseult (puisque la voile sera noire) aura coûté un bit!

1.3.2. La question de la simplification

Le problème du sens n'est, somme toute, qu'un problème secondaire puisqu'elle n'empêche pas la théorie de fonctionner. La signification est tout simplement renvoyée au contexte. Il y a cependant une autre carence qui découle de cette remarque, et qui semble beaucoup plus importante et beaucoup moins remarquée, à savoir que la théorie occulte le système anthropo-social auquel elle renvoie sur ces questions. C'est en fait une constatation assez générale qui témoigne d'un certain esprit "scientiste" de notre époque : une théorie formalisée prend naissance dans un système socialisé sur un véritable problème humain ou de civilisation. Une fois la théorie construite, elle se dépêche d'oublier ses origines et cherche à s'imposer comme une vision du monde et une solution, sinon complète, du moins satisfaisante aux problèmes qui ont justifié sa naissance. Cette "inversion paradigmatique" qui pourrait s'appeler une "simplification abusive", semble être courante dans notre société technologique où beaucoup de systèmes préconisent des solutions basées sur des techniques (fiabes, certes) avant d'avoir même compris ou mis en contexte les problèmes. Par exemple, beaucoup d'abus ou de perversions dans les systèmes d'information, les "solutions informatiques" des organisations reposent actuellement sur cet impérialisme et/ou ce mythe engendré par la théorie de l'information que tout peut passer par le bit et le numérique. "On efface de l'information [...] toute complexité anthropo-sociale, tout en gardant un schème anthropo-social formel (code, quasi-émetteur, quasi-récepteur); on efface, de l'idée cybernétique de programme, le programmeur et l'insertion de la machine artefact dans la mégamachine sociale, et cette machine abstraite devient le modèle de la machine vivante[...]. Et c'est ainsi que l'idée potentiellement civilisatrice d'information [...] est arrivée en barbare" ([Morin 77] Part. 3, Chap. 2, § 2.C).

1.3.3. Information et organisation

Le choix du mot information dans la théorie de Shannon est d'un côté malheureux, puisqu'il ne recouvre pas le sens commun qu'on lui prête, et d'un autre côté volontairement ambigu, puisqu'il conduit à l'attitude dénoncée précédemment. Il reflète cependant une partie d'une réalité qu'il convient d'explicitier.

Dans nos sociétés occidentales, nous assistons à une véritable invasion de l'information, au sens journalistique du terme. En caricaturant à peine, on peut dire que leur seul but est de multiplier les supports et les canaux de transmission informationnels, à un coût d'énergie de plus en plus bas, afin d'organiser les événements qui peuvent les réguler. L'ennui, bien sûr, est que cette surinformation engendre un bruit qui entrave fortement la possibilité de comprendre la société et le monde dans lesquels nous vivons. C'est ce concept de "désordre informationnel" que concrétise la notion d'entropie dans la théorie de Shannon, "et l'on comprend que Shannon ait détecté l'information dans ce secteur de la communication moderne soumis de façon apparemment inexorable à l'accroissement d'entropie." ([Morin 77] Part. 3, Chap. 2, § 5). Cependant, cet aspect n'est qu'un point de vue partiel sur le rôle de l'information dans une organisation, et il convient de l'articuler avec d'autres points de vue complémentaires.

En observant et analysant des systèmes très variés du point de vue de l'information (systèmes vivants et l'information génétique contenue dans les structures de l'ADN, systèmes physiques et l'information transmise par les mesures, système humain et l'information cérébrale stockée par marque chimique, systèmes anthropo-sociaux et l'information au sens des médias multiformes...), Edgar Morin est parvenu à dégager une vision complexe de l'information qui intègre celle de Shannon et permet de mieux appréhender sa nature.

Comme on a pu le voir, le "désordre informationnel" correspond à une augmentation d'entropie d'un système. Inversement, un apport d'information, qui apporte de "l'organisation informationnelle" correspond à une augmentation de la néguentropie du système. La notion de néguentropie est donc liée inéluctablement à la notion d'organisation d'un système, elle-même liée à la notion d'information. C'est ainsi que s'organise, dans une relation tripartite information-néguentropie-organisation la vision complexe d'un système du point de vue informationnel (figure 1.7)

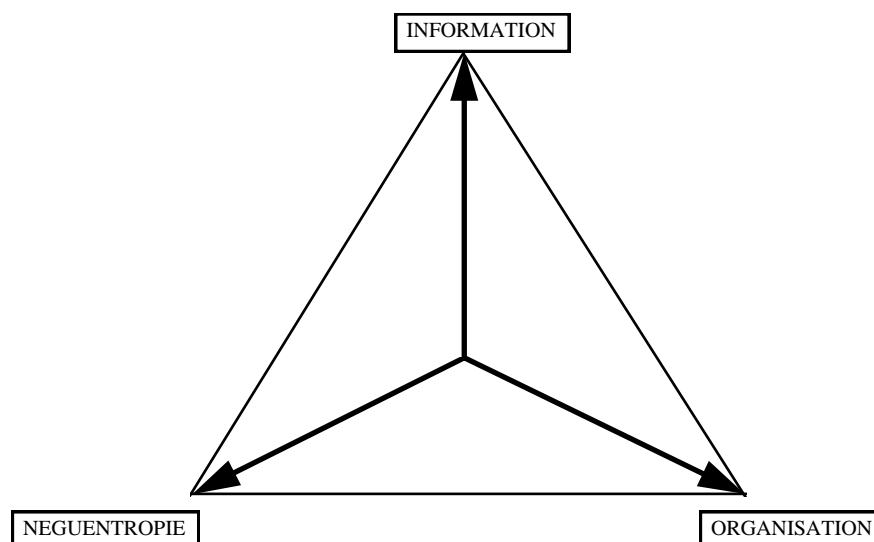


Figure 1.7 : Le triangle d'interactions de l'information dans un système selon E. Morin

Plus généralement, selon Edgar Morin, la néguentropie est un caractère fondamental intrinsèque à un système (une sorte d'essence qui fait qu'un système est ou devient un système perçu comme tel)¹⁵. L'information naît d'un processus organisationnel qui se développe à partir d'interactions événementielles, aléatoires (cette sorte de "hasard nécessaire" dans la création de l'être vivant ou de l'univers). Elle se constitue en même temps que le système développe des capacités de *mémorisation* et de *programmation*. Elle arrive alors au stade qui nous intéresse, où s'établit une équivalence potentielle entre néguentropie et information, telle qu'on peut l'imaginer à travers la formulation de Shannon. La transformation d'information en néguentropie se fait via la production d'événements organisateurs : des informations sont générées par le système qui "suscite des événements précisément pour annuler ou contrecarrer les événements perturbateurs qui sans cesse arrivent de l'extérieur ou surgissent de l'intérieur[...]. L'information génère de l'événement, mais le transforme en ordre et organisation"([Morin 77] Part. 3, Chap. 2, §3.8). Cette transformation ne peut avoir lieu, bien sûr, qu'à partir d'un phénomène de communication, qui fait que l'information est "bien" transmise (Edgar Morin parle d'*information générative* et d'*information circulante* comme de deux moments de l'information). C'est une expérience que nous pouvons souvent percevoir dans notre vécu quotidien : un système se régule (s'organise) globalement par l'intermédiaire de la création/transmission d'information. C'est par exemple le cas dans un système de carrefours routiers (comprenant les structures, les acteurs humains et technologiques) régulé par des feux de circulation.

Cette analyse en trois points de vue néguentropie-information-organisation replace tout système informationnel dans une perspective complexe qui lui donne profondeur et richesse. En une période de vénération quelque peu idolâtre pour tout ce qui concerne l'information au sens large, elle en montre effectivement le caractère organisateur dans le système, caractère évaluable, voire calculable, par la néguentropie du système. Elle a également d'autres conséquences pratiques que nous allons voir.

1.3.4. La quête du Graal de l'information

Le lien de la notion d'entropie en information avec celle de la thermodynamique a déjà été souligné. Il a été longuement étudié et discuté. Léon Brillouin, notamment a formulé un énoncé généralisé du second principe de la thermodynamique incluant l'information ([Brillouin 56]). La relation entre entropie physique et informationnelle est donc plus que métaphorique. Edgar Morin a repris ces travaux, et par une généralisation naissant de la relation indissociable observation-observateur chère aux théories systémiques, il en tire quelques conséquences intéressantes.

L'entropie mesure d'une part l'absence d'organisation au sein d'un système physique, mais aussi l'absence d'information d'un observateur sur le système qu'il considère. La question se pose de connaître alors la nature de

¹⁵ "En termes statiques, toute organisation est un flot de néguentropie. En termes dynamiques, une organisation est néguentropique si elle est dotée de vertus organisatrices actives, lesquelles, en dernier ressort, nécessitent une boucle récursive productrice-de-soi" ([Morin 77] Part. 3, chap. 1).

la relation entre l'entropie/information renvoyant à l'observateur et l'entropie/physique renvoyant à l'objet observé, l'une étant de connotation psychique, l'autre physique. Une réponse est fournie par la physique quantique qui a vu apparaître assez soudainement l'incidence fondamentale des coûts d'acquisition d'information (des mesures) sur la "réalité" physique, à travers le "Principe d'incertitude d'Heisenberg" : il est impossible de mesurer avec précision la position d'une particule, on ne peut obtenir qu'une position en termes de probabilité, donc incertaine. D'où l'idée que toute mesure perturbe nécessairement le système mesuré, et que la précision obtenue est statistiquement équivalente au désordre causé. Léon Brillouin dégage de même le caractère transformateur, non seulement de toute expérimentation mais aussi de toute mesure : toute observation, toute acquisition d'information modifie physiquement le système global (phénomène, dispositif, observateur). Edgar Morin le généralise à toute observation, toute connaissance, même lorsqu'elle ne comporte ni expérience ni mesure. "Tout ce qu'on gagne en information (psychique) peut se gagner en organisation (biologique, anthropologique, noologique, sociologique), mais se paie quelque part en désordre (physique). Tout accroissement de l'information accroît donc et l'organisation, et le désordre dans le monde." ([Morin 77] Part. 3, Chap. 7, § B.2).

Une conséquence importante de cette proposition concerne une nouvelle notion de *prix de l'information*. En effet, pour obtenir une information exhaustive dans un système, ce qui nécessiterait une information infinie, il faudrait une néguentropie infinie ce qui "dilapiderait l'univers. La connaissance portée à l'absolu est autodestructrice"¹⁶. Le message est donc lancé, dans leur quête du Graal, à tous les tenants du tout information, des bases de données gigantesques, ou de la recherche exhaustive (qui pourrait bien prendre ici le sens anglais de "épuisante") de l'information. La recherche, le stockage d'information n'est pas innocent. Elle a des conséquences : sur l'organisation du système qu'elle augmente (jusqu'à le paralyser par une néguentropie trop forte !), et sur le désordre du système qu'elle augmente aussi. Imaginons un instant que l'organisation de la circulation ne nous apparaisse pas assez structurée, et qu'au lieu de communiquer, via les feux de circulation, trois ou quatre messages, on décide d'en transmettre une centaine. Certes, l'organisation devrait y gagner, mais on imagine aussi le désordre (bien physique celui là !) que cela peut engendrer !

Cette dernière remarque débouche sur les limites de la connaissance elle-même, inhérente à son caractère informationnel. Nous sommes de fait condamnés, en tant qu'observateurs, à ne connaître l'Univers qu'à travers des messages et au-delà, rien. Ces messages, c'est nous qui les fabriquons, sous le coup d'impulsions dont nous ignorons la vraie nature, bien que nous ayons un code pour les nommer. Mais toute observation sur le monde s'accompagne de réajustements dans nos systèmes d'idées. Les transformations dans les idées et les théories peuvent déclencher des modifications dans l'action et le comportement, on débouche sur des transformations en chaîne. Un mot bien placé, dit au bon moment, peut faire naître ou s'écrouler un monde. ([Morin 77] Part. 3, Chap. 7, § B.2). Cette idée d'information génératrice inéluctablement d'organisation et de désordre, basée sur la relation néguentropie informationnelle/entropie thermodynamique (i.e. du coût thermodynamique de l'information) a été l'objet de nombreuses discussions et controverses qui sont loin d'être terminées actuellement (cf. par exemple [Delahaye 94]).

¹⁶ Pour illustrer cette idée, E. Morin reprend l'image de Niels Bohr qui disait qu'il faudrait, à la limite, tuer un chien pour savoir comment il vit ([Bohr 58]).

Chapitre 2

Connaissance et signification

Aspects structurels

2.1. Introduction

Le problème du sens (ou de la signification, ces mots seront considérés comme synonymes, contrairement à l'usage de certains) est le premier qui se pose quand on veut dépasser le problème de l'information brute tel qu'il a été évoqué dans le chapitre précédent. Ce n'est bien évidemment pas un problème simple. Comment attacher un sens à des messages codés, qui ne sont que des organisations de bits, comment le repérer, le stocker... ? Le problème de base est bien sûr la nature du sens. C'est un problème sans doute vieux comme l'être humain, et il n'est pas dans notre propos d'y rajouter des considérations nouvelles, qui seraient nécessairement naïves.

Cependant, après avoir noté l'énorme influence de la théorie de l'information sur toutes les analyses sur la culture en général, il faut remarquer qu'une théorie moderne du sens s'y est greffée et qu'elle vaut la peine de s'y arrêter quelque peu. D'autant plus que c'est dans cette mouvance que sont apparues les technologies de la connaissance qui nous intéressent en premier lieu, notamment celles dites du "génie cognitif" ("knowledge engineering" ou "ingénierie des connaissances" en anglais ou français). Dire que cette notion du sens se greffe sur celle d'information est déjà réducteur, mais elle pose un problème clair : comment passer de la représentation de l'information à la représentation de la connaissance ? Autrement dit, quelle représentation symbolique peut-on associer à un codage d'information, ou encore comment (re)coder un message informationnel en message signifiant ?

En posant le problème de cette façon, on l'a déjà réduit, et c'est d'ailleurs une des grandes critiques qui a été faite sur ce point de vue. En effet, on se place dans le modèle "génétique" de l'information de Shannon, où la communication du sens est conçue à l'instar de la transmission de l'information : avec, d'une manière simplificatrice, un émetteur, un canal, un message et un récepteur (cf. § 2.2.1). C'est une hypothèse très réductrice, qui sera remise en question plus tard, mais que nous adopterons provisoirement, car elle permet de comprendre, et de définir clairement ce que peut être la signification.

Dans ce tourbillon du sens, qui nous entraîne dangereusement dès qu'on veut s'y plonger, il est d'autres hypothèses simplificatrices qui se sont révélées extrêmement fécondes et qui se sont développées de manière très importante depuis le début du siècle, sur lesquelles tout regard sur la connaissance ne peut pas ne pas s'arrêter. Puisant dans différents aspects de la linguistique, intégrant des courants de pensée tels que le structuralisme, elles ont fondé une théorie du "signe", encore appelée sémiotique. Cette théorie postule que tout "objet culturel" (toute connaissance en est un par excellence) peut être étudié comme un objet de *communication*, et que c'est même seulement dans ce point de vue qu'on peut découvrir certains de ses mécanismes de base. De plus cet objet culturel peut être réduit, pour les besoins de la cause (donc souvent arbitrairement), à un *système de signes* symboliques qui est une sorte de code sémantique, au même titre qu'il y a un code pour les éléments d'information, qui sert donc à véhiculer le sens porté par cet objet.

Dans ce chapitre, nous considérerons désormais un système de connaissances comme un système de signes, porteur de significations à travers un codage spécifique. Le problème qui se pose alors est identique à celui de la théorie de l'information : comment coder et décoder un système de signes porteur d'une signification (un système sémantique) à travers un canal de communication ? Ce problème se décompose en deux sous problèmes. Le premier est le problème du codage, ou des unités de codage, qui sont bien sûr de nature bien différente du bit de la théorie de l'information. On utilisera une hypothèse dite "componentielle" qui suppose l'existence d'unités discrètes de sens, qu'on peut déceler dans les systèmes de signes qu'on appelle *traits sémantiques* ou sèmes, et qui peuvent servir à coder le sens. Le premier problème se réduit alors à identifier la manière dont apparaissent ces traits, c'est ce qu'on appellera la *génération de la signification*. Le second problème est celui de l'organisation du code sémantique, à savoir les structures qui permettent de stocker et d'organiser les unités de sens dans leur complexité, c'est ce qu'on appellera *l'organisation de la signification*.

Le phénomène du codage et décodage de la signification d'un système est essentiellement, comme on le verra, un phénomène culturel, donc humain. Il n'est pas étonnant alors de puiser dans les immenses ressources des sciences humaines quelques fondements théoriques. On retrouvera donc ci-dessous des contributions fondamentales venant de la linguistique, de la psychologie cognitive et de l'anthropologie, disciplines qui ont su, au fil du temps et sous l'impulsion de penseurs remarquables, acquérir des démarches scientifiques originales et puissantes que nous pouvons reprendre à notre compte.

2.2. La signification dans le processus d'information

2.2.1. Le schéma du processus d'information selon Shannon

On emploie ici le terme de *processus d'information* plutôt que processus de communication qui est plus couramment employé, pour éviter un certain nombre d'ambiguïtés et de confusions, et pour garder une certaine cohésion avec la notion d'information qui vient d'être développée. Le processus d'information peut être défini comme le codage et la transmission de l'information dans un système, donc son évolution dans le temps à travers un certain nombre de processeurs (on retrouve ici l'aspect génétique de l'information, mais sous un aspect relativement réduit). C'est encore Claude Shannon qui a fourni un modèle de processus d'information pour accompagner sa théorie. Là encore, c'est un modèle qui a été élaboré pour des besoins techniques, et qui est d'ailleurs d'une simplicité limpide quand il s'agit de comprendre la transmission d'informations dans des réseaux de télécommunication. Là encore, ce modèle a été repris dans des contextes extrêmement variés, où sa compréhension n'est pas toujours aussi claire, et s'est presque imposé comme un modèle de référence de toute théorie ou réflexion sur la communication. Ceci du moins jusqu'à une remise en cause assez récente, parfois sévère, du côté de la pragmatique et des courants interactionnistes (la fameuse "école de Palo Alto" par exemple).

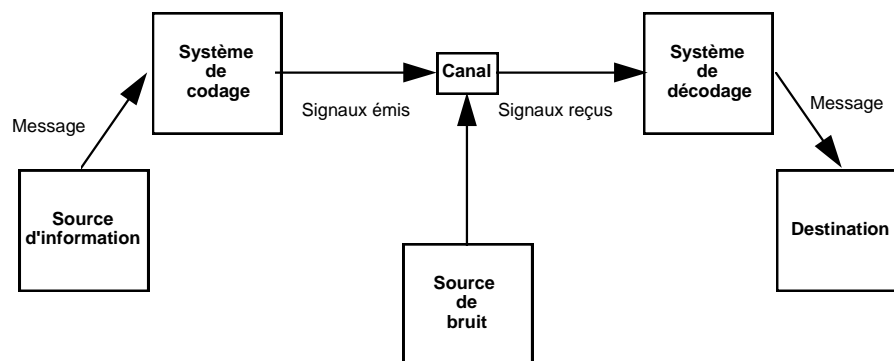


Figure 2.1 : Le processus d'information d'après Shannon

Détaillons un peu ce modèle (figure 2.1). Un processus d'information se déroule dans un système tapissé de processeurs à travers lesquels évolue (naît, vit, meurt, "s'engramme"...) l'information. Le premier processeur est la *source d'information* où se constitue l'ensemble des messages à transmettre. Ce peut être un événement, une situation, un objet... qui engendre ou nécessite la création d'un ensemble de messages. Une révolution, une catastrophe, une observation, une situation sont des sources d'information. Par exemple, la circulation automobile à un carrefour est une source d'informations, et l'on peut d'ailleurs imaginer aisément sa complexité. Cependant, de cette situation on peut extraire un ensemble de messages destinés à circuler dans le système, en général pour des motifs d'organisation néguentropique, comme il a été déjà souligné. Dans l'exemple en question, on choisit trois ou quatre messages. Ces messages sont ensuite codés et transmis sous forme de signaux par un *émetteur*. Le code utilisé établit une correspondance entre des *signifiants* (les signaux) et des *signifiés* (les messages). On a déjà vu par exemple les codes des feux de circulations, émis sous forme de signaux lumineux, les signifiants sont clairs, on verra qu'il n'en est pas de même des signifiés. Les signaux émis sont ensuite véhiculés par un *canal*. Ce processeur est supposé unique dans le modèle de Shannon (où il peut être caractérisé physiquement par des mesures telles que le débit etc.), ce qui a été ensuite souligné comme une grande faiblesse du modèle. Les signaux transmis sont reçus par un *récepteur*, ils sont décodés et les messages sont alors restitués vers leur *destination* prévue où ils sont interprétés pour, dans la plupart des cas, déboucher vers des actions destinées à modifier certains éléments du système ou leur comportement. Par ailleurs, existe une *source de bruit* qui perturbe la transmission du message, dont on a déjà vu l'importance sur le codage du message lui-même.

On le voit, le modèle du processus d'information de Shannon, s'il est extrêmement opérationnel, est assez réducteur et élude un certain nombre de problèmes : choix de la source et de la cible du processus, choix du code de transmission, nature du canal. On a posé même des questions qui remettent en cause fondamentalement ce modèle : peut-on réellement distinguer dans un processus de communication (et non plus d'information cette fois-ci), une source et une destination ?, n'existe-t-il pas une multitude de canaux de transmission simultanée pour un message entre un destinataire et un destinataire ?, etc. On retiendra cependant ce modèle, car il nous permettra de rendre compte du passage du processus d'information au *processus de signification*, de *l'Univers du signal* à *l'Univers du sens*. Essentiellement, comme on le verra, on retiendra dans ce modèle l'existence (contestée par ailleurs) d'un destinataire (émetteur/codeur) et d'un destinataire (récepteur/décodeur) et d'un code, le processus génétique de la signification étant, pour peu qu'on ait tenté de le définir, singulièrement plus complexe que celui de l'information (cf.. [Eco 88] Chap. 4).

2.2.2. Signification vs stimulation

Une des premières constatations que l'on peut faire en ce qui concerne le processus de signification est que c'est un processus indirect, où les phénomènes ne sont pas réductibles à une explication causale simple[Eco 88]. Quand une lumière nous aveugle, nous fermons les yeux; à une intersection, quand le feu rouge s'allume, nous freinons. Ces deux actes relèvent a priori du réflexe, tel que les célèbres études de Pavlov ont cherché à le démontrer. Pourtant, ils sont fondamentalement différents. Le premier est de type dyadique stimulus/réponse : le signal provoque directement l'action, sans intermédiaire. Le second est de type triadique : le signal intervient comme un signifiant et ne provoque pas directement l'action. C'est un code qui nécessite des opérations complexes de compréhension et de décision de la part du destinataire. Dans le premier cas, il n'y a pas de processus de signification, alors qu'on peut facilement identifier un processus d'information, neurobiologique par exemple. Dans le second cas se déroule un processus de signification qui est caractérisé par son caractère *indéterministe* : ce n'est malheureusement pas parce que le feu est rouge que nous pouvons en déduire de façon certaine que la voiture va s'arrêter. Il est également caractérisé par son caractère *réversible* : si nous décodons le signal "feu rouge" en "s'arrêter", nous sommes capables d'établir un lien réciproque entre l'acte "s'arrêter" et le signal "feu rouge", qui nous permet d'ailleurs de faire disparaître le lien informatif/préscriptif entre "feu rouge" et "s'arrêter", comme l'indique l'expression métaphorique hautement significative "griller le feu rouge" ! En raison de ce caractère réversible, le processus de signification est un processus intellectuel et non pas un simple processus de stimulation-réponse. Comme l'a signalé Piaget ([Piaget 68] Chap. 4), les processus intellectuels fondamentaux se décrivent par des lois de groupe, au sens mathématique (groupe des déplacements, groupe INRC dit groupe de Piaget, sur lequel nous aurons l'occasion de revenir etc.), dont une des principales caractéristiques est d'être inversibles.

Remarquons au passage que ces remarques battent déjà en brèche le modèle de Shannon, puisque le caractère indéterministe du processus réduit singulièrement le rôle du décodage, et rejette un grand nombre de choses dans l'environnement du destinataire. De même, la réversibilité détruit quelque peu la chaîne unidirectionnelle de l'émetteur vers le récepteur, et par là la notion même d'émetteur et récepteur.

2.2.3. Les fonctions dans le processus d'information

Dans la théorie de Shannon, la nature de l'information est indissociable du modèle de transmission de cette information (le processus d'information), même si ces deux points ont été exposés de manière "indépendante". Ceci n'est encore une fois que la constatation, maintes fois soulignée par les théories systémiques, de l'imbrication essentielle entre les aspects ontologique et génétique d'un système. La difficulté prévisible d'aborder l'ontologie de la signification est qu'on ne dispose pas vraiment d'un modèle génétique décrivant le processus de signification. On se base donc sur un modèle "à la Shannon", mais comme on vient de le voir, c'est pour s'apercevoir qu'il est bien inadéquat !

Nous assumerons donc cette contradiction, et nous allons même en abuser en réutilisant un modèle qui a eu un énorme impact sur l'ensemble des sciences de la communication, même s'il est maintenant vivement critiqué¹⁷. C'est le modèle de subdivision des fonctions du langage présenté par Jakobson dans un texte célèbre "Linguistique et poétique" ([Jakobson 1963] Chap. 9), qui est à la base des études sémiotiques sur le message esthétique¹⁸. Ce modèle est basé sur celui de Shannon et assigne à chaque processeur une fonction qui intervient

¹⁷Un article de Francis Jacques de 1981 porte le titre très polémique "Le schéma jakobsonien de la communication est-il devenu un obstacle épistémologique?"

¹⁸Ce modèle est "désormais propre à la conscience sémiologique" ([Eco 72])

dans le processus de signification, définissant celui-ci donc, à partir du processus d'information. Nous l'utiliserons, comme cela a été fait souvent, dans un contexte plus général que celui du langage (Figure 2.2).

La fonction expressive (ou émotive) est caractéristique de l'émetteur à l'égard de son message, elle n'agit pas sur la signification fondamentale du message, mais y rajoute un autre type de message (emphatique, émotif...). Dans le langage, un type d'exemple souvent cité est celui des phonèmes "i court" (/i/) et "i long" (/i:/). En tant qu'opposés l'un à l'autre, le message qu'ils véhiculent n'est pas de la même nature par exemple en anglais ou en français. En anglais, ils distinguent réellement deux mots (deux messages) à signification différente, comme dans "sheep" (mouton) et "ship" (navire), ou "sleep" (dormir) et "slip" (glisser). Ce n'est pas le cas en français, où ils peuvent distinguer deux variantes d'un même mot, en y rajoutant une connotation emphatique par exemple, comme dans "vite !" ou la convention d'écriture "viiiite !". Dans le deuxième cas, l'information différentielle est d'ordre expressif, ce qui n'est pas vrai dans le premier cas. Dans l'exemple des feux de circulation, on pourrait illustrer cette fonction par certains feux dont la taille du feu rouge est plus grande que celle des autres, marquant bien une emphase qui n'a pas d'impact sur la signification propre du message.

La fonction phatique rend compte du processus d'établissement de la communication (établir, prolonger, interrompre... le contact) entre le destinataire et le destinataire. Elle rajoute des données (messages ou connaissances) dont le but est d'agir sur la tendance à communiquer et non pas sur la capacité d'émettre ou de recevoir. C'est la première fonction à être acquise par les enfants, bien avant la capacité langagière. Dans le langage courant, cette fonction se reconnaît par les nombreuses expressions quelque peu rituelles comme : "allô", "écoutez", "très bien", "d'accord" etc. qui n'ont d'autre fonction que d'assurer ou maintenir une bonne qualité de la communication. Dans l'exemple des feux de circulation, on pourrait illustrer cette fonction par tous les éléments qui préparent ou facilitent la lecture des feux : panneaux indicateurs préventifs, ralentisseurs, positionnement des feux (suspendus au milieu de l'intersection, bien en vue aux angles...), "plaques sensibles" en revêtement spécial pour les piétons non-voyants etc.

La fonction référentielle est essentielle, bien que difficile à cerner. Selon Jakobson, "la visée du référent, l'orientation vers le contexte - bref la fonction dite "dénotative", "cognitive", référentielle - est la tâche dominante de nombreux messages". Nous aborderons plus loin ces problèmes, mais il est clair qu'un message se constitue et s'interprète à partir d'une situation, d'un contexte donné. Déjà, en 1968, Umberto Eco parlait de deux catégories contextuelles générales, en dehors du processus de signification tel qu'il le définit et qui est repris ici (le processus sémiotique) : la situation de communication et l'ensemble du patrimoine de connaissances (cf. [Eco 82] Sec. A Chap. 2 § I). Il est évident par exemple, qu'un système de feux de circulation ne se lit pas de la même façon suivant les pays et les circonstances (il est connu que dans certaines villes dans certaines parties du monde, à partir de certaines heures de la nuit, il ne faut pas s'arrêter aux feux rouges !).

La fonction esthétique (poétique, à laquelle voulait en venir Jakobson) concerne la constitution du code même. Elle est destinée à attirer l'attention du destinataire sur sa propre forme. C'est le cas flagrant des jeux de mots. Cette fonction est heureusement quasiment absente dans les systèmes de feux de circulation, où l'on voit mal un automobiliste se mettre à réfléchir, comme on le fait ici à longueur de page, sur la constitution du code des feux de circulation ! Il n'est pas raisonnable non plus de penser à créer des systèmes de feux à forte fonction esthétique (des feux "œuvres d'art" par exemple) qui distrairaient les conducteurs des messages fonctionnels de base !

La fonction métalinguistique est centrée sur le code lui-même. Elle interroge le signe lui-même : "que veut dire ce mot ?", dans un processus de communication elle peut par exemple retourner une séquence non interprétée. Cette fonction intervient peu ou pas du tout dans le cadre des feux de circulation, elle est évitée par l'apprentissage, mais elle peut resurgir par exemple dans le cas d'aphasiques ou de daltoniens !

La fonction conative (ou impérative) est orientée vers le destinataire. C'est elle, qui après l'interprétation nécessaire dans le processus, rend compte de l'action qui doit être accomplie par ce dernier. L'exemple typique dans le langage est fourni par l'impératif, et dans les feux de circulation par la prescription indiquée par les signaux.

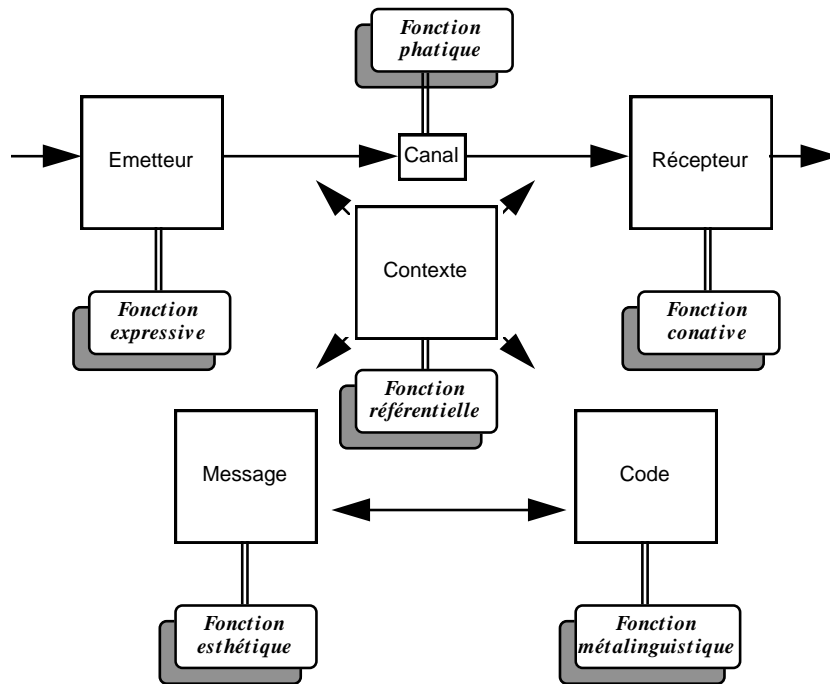


Figure 2.2 : Les fonctions du processus informatif d'après Jakobson

La perception de la composante du sens de la connaissance dans un processus de signification, à travers des modèles tels que celui qui viennent d'être abordés, se révèle donc multiple et complexe par les différentes fonctions qui entrent en jeu. Ces fonctions sont toutes présentes à des degrés divers et interagissent entre elles. Départager ce qui, dans la connaissance, revient à telle fonction relève parfois de l'arbitraire. On peut même être amené à remettre en cause le modèle. Après avoir défini la composante de l'information dans la connaissance, dans un souci de continuité méthodologique, nous restreindrons notre étude de la composante signification en se basant sur ce même modèle. Nous adopterons désormais le point de vue de la sémiotique : la connaissance ne sera plus vue comme un *système de messages codés dans un processus d'information*, mais comme un *système de signes dans un processus sémiotique* (de signification). La signification, telle qu'elle va être étudiée maintenant, concerne essentiellement la fonction référentielle (cognitive) et partiellement la fonction conative du processus d'information (donc orientée vers le destinataire/décodeur). Le processus d'information devient un processus de signification quand "le signal n'est plus constitué par une série d'unités discrètes, calculable en bits d'information, mais il est une forme signifiante que le destinataire humain devra remplir de signifié" ([Eco 72], Sec. A Chap. 2 § I)

2.2.4. Génération et organisation de la signification

On distinguera deux aspects dans la signification d'un système de connaissances, qui désormais, sur l'axe d'étude qui nous occupe, est ramené à un système sémiotique, comme on vient de le définir. Le premier est celui de la construction des éléments du système qui rend compte des "effets de sens", c'est-à-dire qui "explique" peu ou prou comment est perçue ou se construit la signification. C'est l'*aspect phénoménologique* de la signification. Le second aspect concerne les structures qui organisent la "mémoire sémantique" au sens de la psychologie cognitive et qui permettent de stocker l'ensemble des significations (ou du moins une partie !) attachées à un système de signes. C'est l'*aspect structurel* de la signification. Nous allons examiner ces deux points successivement en détail

2.3. Génération de la signification

2.3.1. Les unités de sens

Un ensemble de connaissances se manifeste, entre autres, par un ensemble de messages (visuels, parlés, écrits...) qui transmettent non seulement de l'information, comme nous l'avons vu, mais aussi du sens. Si les codes, tels qu'ils ont été évoqués dans la théorie de l'information, peuvent rendre compte de l'information, quelles sont les "formes" qui peuvent rendre compte du sens ? La psychologie cognitive, notamment la

psycholinguistique (cf. par exemple [Caron 89] Chap. 2), situe le problème de la compréhension (processus du sens) dans une analyse à plusieurs niveaux. Le premier niveau, nécessaire et incontournable, est celui de la découverte d'unités élémentaires qui président à la naissance du sens. Il n'y a pas de réponse unique à l'existence d'unités élémentaires - de même qu'il n'y a pas de réponse unique à l'unité élémentaire de composition de la matière (qu'on a cru longtemps être l'atome). Cela dépend du système étudié et du niveau de granularité recherché. Donnons quelques exemples.

Dans le langage, l'unité élémentaire pourrait être le mot, ce qui semblerait évident. Cependant, les linguistes ont depuis longtemps montré qu'on pouvait dégager des unités élémentaires beaucoup plus petites qui semblent à la fois arbitraires et très puissantes. L'exemple le plus connu, et qui a été à l'origine de toute cette approche appelée componentielle, est celui de la phonologie et a été initialisé par Roman Jakobson ([Jakobson 63] Chap. 6). Ainsi, pour caractériser l'ensemble des sons (des mots parlés) produits dans une langue, on introduit un certain nombre de classes qu'on appelle *phonèmes*. Le phonème est une classe de sons, qui peut être réalisée par des sons différents (timbre, intensité, prosodie... pouvant varier). Pour reprendre un exemple déjà cité plus haut, on peut déterminer une classe de sons (notée /i/) représentant le son "i" en français, et deux classes de sons en anglais (le i court noté /i/ et le i long noté /i:/). On voit donc qu'il n'y a pas de système universel d'unités élémentaires, et on verra un peu plus loin comment on peut identifier l'ensemble de ces unités, par exemple pour une langue donnée. Remarquons d'ores et déjà que le nombre d'unités élémentaires (de phonèmes) est extrêmement réduit (d'environ 20 à 50), comparé au nombre immense de mots pertinents formés avec ces phonèmes.

Dans les études sur la sémantique vue par la linguistique ([Greimas 66] par exemple) ou la psychologie cognitive ([Le Ny 89] par exemple), on introduit (de manières distinctes, mais pas nécessairement incompatibles) des unités élémentaires qu'on appelle *traits sémantiques* ou *sèmes*. Les traits sémantiques sont "des entités stables, en dernière analyse de nature psychologique, qui sont des supports de discrimination" ([Le Ny 89] Chap. 2). On peut ainsi discriminer le sens du mot "orage" dans "il y de l'orage dans l'air entre eux" ou dans "le bulletin météo prévoit de l'orage" par les traits sémantiques /humain/ ou /non-humain/. L'ensemble des traits sémantiques présents (ou qu'on élucide ou construit) dans un message est supposé rendre compte de la signification de ce message¹⁹.

Il est clair, vue la complexité perçue du problème, qu'un ensemble seul d'unités élémentaires, sans structure organisatrice n'est pas suffisant pour rendre compte de la nature de la signification. Cet ensemble possède un certain nombre de structures sur lesquelles nous allons nous pencher maintenant.

2.3.2. La structure élémentaire de la signification : le carré sémiotique

Ce titre reprend celui d'un chapitre de l'ouvrage collectif [Entrevernes 84] qui expose avec beaucoup de clarté la théorie de Greimas sur la sémantique structurale ([Greimas 66], [Greimas 70], [Greimas 83]), et qui a fait l'objet d'une formalisation mathématique dans [Ermine 89]. Greimas, à la suite de bon nombre de sémanticiens, a posé les bases d'une théorie formelle du sens. Cette théorie décrit les éléments fondamentaux et la manière dont ils se structurent *de manière interne* pour engendrer le sens dans un ensemble de traits sémantiques. Cette théorie se base sur des principes élémentaires qui ont été longuement élucidés et débattus dans de nombreuses disciplines.

Le premier principe est celui de l'*axe sémantique* : un trait sémantique ne se charge de sens que lorsqu'il est couplé à un autre trait. Un terme isolé n'a pas de sens. Le couple de traits sémantiques, perçu et retenu comme engendrant un effet de sens, est appelé axe sémantique. Ces axes sont déterminés en fonction de la réalité perçue ou des besoins de l'analyse. Par exemple, le trait sémantique /vert/, placé dans l'axe sémantique /vert/ vs /rouge/, prend aussitôt un sens pertinent dans le processus de signification d'un feu de circulation. Dans l'axe sémantique /vert/ vs /cyan/ (cyan est la couleur complémentaire du vert) il prend le sens d'une couleur, telle qu'elle est définie dans un système de référence comme le système de couleur RGB (Rouge, Vert, Bleu).

Le second principe est celui de l'*opposition* ou de la *différence*. Un axe sémantique étant donné, le sens n'apparaît que grâce à la différence qui est faite par l'esprit humain entre les deux traits en question. L'axe

¹⁹ "Dans un modèle à traits, une représentation conceptuelle peut dès lors être considérée comme un ensemble de représentations plus élémentaires, c'est-à-dire d'informations durables, stockée en mémoire à long terme, dont la fonction est de constituer des supports de discrimination, susceptibles d'être mis en oeuvre pour faciliter de multiples activités, instantanées ou à court terme, de discrimination, dans la perception, le rappel, la pensée, la compréhension du langage etc." ([Le Ny 89] Chap. 2)

sémantique se traduit non pas comme un ensemble de deux traits, mais comme un couple différentiel, un trait n'ayant un sens que dans la mesure où l'on perçoit la différence avec l'autre. Comme le dit le proverbe, la lumière n'existe que parce qu'il y a de l'ombre. Par exemple /vert/, dans l'axe sémantique /vert/ vs /rouge/ n'a de sens que dans la mesure où il se différencie ou s'oppose à /rouge/, tout automobiliste en conviendra. C'est cette opposition qui est indiquée par le symbole vs (versus). Ce principe d'opposition a été pour la première fois posé par Roman Jakobson ([Jakobson 63], Chap. 6) en phonologie²⁰, et cette idée extrêmement riche et féconde, malgré une simplicité apparente, a marqué toutes les sciences humaines et tout le courant structuraliste qui a suivi²¹.

Le troisième principe est celui de la *contradiction*. Tout concept présuppose son contraire. Si un sens apparaît pour un trait, l'esprit perçoit également le sens contraire ou contradictoire. Ainsi, en plus du second principe, un trait prend sens non seulement par son opposé, mais aussi par son contraire. Le contraire ou contradictoire peut s'exprimer comme la négation du trait. Ainsi, le contraire du trait /vert/ est $\overline{\text{/vert/}}$ (qui se lit non-vert), mais dans le contexte des feux de circulation, on voit immédiatement que ce trait peut se réinterpréter en /orange/, si l'on considère que le feu orange est le contraire du feu vert. On se rend compte par ce biais de l'ambiguïté des feux tricolores français, par exemple, où le trait /orange/ est perçu tantôt comme contraire de /vert/, tantôt comme contraire de /rouge/. C'est une ambiguïté qui alimente sans doute nombre de discussions et qu'on utilisera aussi plus tard. On peut noter que cette ambiguïté n'existe pas dans les feux de deuxième catégorie où on peut identifier clairement les contraires de /rouge/ et /vert/. Remarquons d'autre part que l'axe sémantique $\overline{\text{/vert/}}$ vs $\overline{\text{/rouge/}}$ peut jouer exactement le même rôle que l'axe /vert/ vs /rouge/, si l'on admet la

règle de double négation : $\overline{\overline{\text{/trait/}}} = \text{/trait/}$ ²².

Ainsi, pour reprendre l'exemple des feux tricolores, l'ensemble des messages transmis (les trois ou quatre configurations de feux) prend un sens parce qu'il s'inscrit dans une structure où se retrouve l'axe sémantique /vert/ vs /rouge/, dont l'effet de sens provient de l'opposition perçue entre ces deux traits, et où se retrouve aussi l'axe des contraires $\overline{\text{/vert/}}$ vs $\overline{\text{/rouge/}}$. On a l'habitude de représenter graphiquement la présence de ces trois principes dans un processus de signification par un carré, dit carré sémiotique, comme le montrent les figures 2.3 et 2.4. Le carré sémiotique est donc une structure élémentaire qui modélise les effets de sens dans un système.

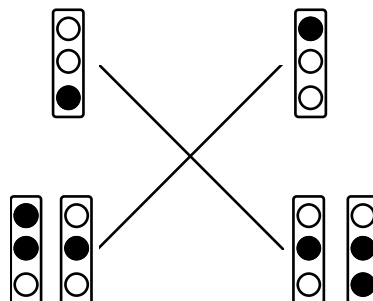


Figure 2.3. Le système des feux de circulation organisé dans un carré sémiotique

²⁰ "Ce qui caractérise un phonème, ce sont les différences par lesquelles il s'oppose aux autres phonèmes du système de la langue. Ainsi, les phonèmes /b/ et /p/ s'opposent par le fait que le premier est sonore, ou voisé (c'est-à-dire accompagné d'une vibration des cordes vocales), le second sourd, ou non voisé (les cordes vocales ne vibrent pas); cette même opposition se retrouve entre /d/ et /t/, /g/ et /k/, /v/ et /f/, etc. On peut dresser une liste de ces *traits distinctifs*, qui représenteraient ainsi les unités élémentaires sur lesquelles sont constituées les langues." ([Caron 89], Chap.2, §1)

²¹ "Toute communication (et dès lors toute signification) opérerait sur la base d'oppositions organisées en système." ([Eco 88], Chap. 3, §3.3)

²² Cette règle, si elle est paraît triviale au niveau de la logique, peut facilement être battue en brèche dans d'autres points de vue, puisque le fait de nier deux fois une assertion ne ramène bien évidemment pas tout à fait la même assertion !

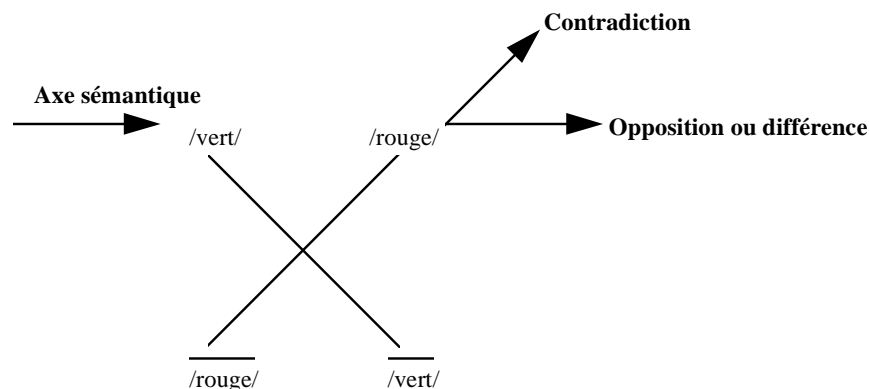


Figure 2.4. Reformulation du carré sémiotique des feux de circulation

2.3.3. Dénotation et connotation

Quand on considère un système qui "cherche" à transmettre des connaissances à travers des messages, des codes, que perçoit-on réellement ? A travers les impressions confuses et complexes qu'il semble difficile d'analyser, on peut cependant distinguer plusieurs niveaux d'appréhension.

Dans l'exemple des feux de circulation, le premier niveau d'analyse, qui vient d'être fait, est une représentation de base qui ne peut être remise en cause, sans changer radicalement la connaissance sur les systèmes de feux. L'opposition vert/rouge est universellement reconnue (heureusement !), et constitue donc une signification de base, qui caractérise l'ensemble des feux de la planète. Dans le patrimoine de connaissances des conducteurs automobiles, la figure 2.4 représente donc la signification commune des feux, alors qu'aucun feu n'est identique en réalité. Le carré sémiotique des feux de circulation réfère donc à l'ensemble des feux existants (ou virtuels, ou à venir). Tout conducteur destinataire du message d'un feu de circulation doit posséder cette référence. On dit que l'ensemble des messages des feux de circulation, structuré par le carré sémiotique cité, qu'on appellera code dénotatif de base, dénote l'ensemble des feux de circulation. La *dénotation* d'un signe ou système de signes désigne donc la classe des objets qu'elle représente (qu'elle nomme, par exemple, dans le cas du langage). C'est la dénotation qu'on cherche à représenter par la notation habituelle /vert/ pour éviter de confondre la notion évoquée avec toutes les connotations possibles, pouvant prêter à confusion (qui s'opposent donc à la dénotation). On voit d'ailleurs que, bien souvent, cette dénotation ne prend corps réellement qu'intégrée à un carré sémiotique. La dénotation est une notion qui a été longuement débattue par les philosophes, car elle n'est pas aussi évidente qu'il y paraît, au point qu'on peut se demander si elle a une existence ou une fonction réelle²³.

Quand on aborde les autres niveaux, relatifs à la *connotation*, les choses deviennent singulièrement plus compliquées. Les connotations sont des interprétations, des significations attachées aux signes qui ont la particularité d'être alternatives, voire facultatives. Contrairement à la dénotation, elles ne sont pas partagées, ou du moins pas partagées de la même façon par les acteurs du processus de signification. Elles se greffent sur les codes dénotatifs de base, pour les interpréter, les évaluer. Sur le carré sémiotique de base de la figure 2.4, les premières connotations qu'on peut y voir sont celles attachées aux prescriptions connotées par chaque configuration (la fonction conative de la signification évoquée plus haut). La première connotation évidente est liée au signe /vert/ (qui dénote l'allumage du feu vert et l'extinction des autres), elle prescrit le passage du véhicule. Elle s'oppose au signe /rouge/, qui prescrit de ne pas passer. En fait, si on connote /vert/ par /passer/, il serait tentant de connoter /rouge/ par /passer/. Ce n'est pas pertinent, car /rouge/ n'est pas le contraire de /vert/, mais l'opposé. De plus, cela supposerait la même connotation que /vert/ (le feu orange qui s'allume avec le feu vert pour signifier de ne plus passer donc de s'arrêter, pour prendre l'exemple des feux de second type, d'une interprétation plus claire dans ce cas). De même, la connotation de /rouge/ (le feu orange qui s'allume avec le

²³ "Nous utilisons les signes précisément parce qu'ils sont affectés à des associations conventionnelles [...]. Un écrivain sait que s'il introduit le terme /maman/ dans un texte, il sera extrêmement difficile pour le lecteur d'éliminer les connotations associées à la dénotation primaire du terme. [...] L'usage connotatif d'un signe est donc fondamental, au point que l'on pourrait se demander s'il existe des signes non connotatifs et purement dénotatifs" ([Eco 88], Chap. 3, § 3.6)

feu rouge) s'oppose à la connotation de /vert/ en signifiant de partir. Une bonne connotation de /rouge/ est donc /rester/ par opposition à /passer/. La connotation ainsi obtenue, qui se greffe sur la dénotation du système de feux de circulation représentée par la figure 2.3 ou 2.4 est donc représentée par le carré sémiotique de la figure 2.5. Sur ce petit exercice, on s'aperçoit déjà que les choses ne sont pas si simples qu'il n'y paraît. Notamment il peut être assez difficile de mettre des termes appropriés sur les connotations pour exprimer les notions d'opposition ou de contraire, les ressources de la langue ne sont pas toujours suffisantes. Par exemple si l'on avait utilisé la connotation de /passage/ au lieu de /passer/, il n'existe pas de mot "restage" et le substantif "arrêt" désigne (connote) en français à la fois l'action de s'arrêter et l'état d'être arrêté. On remarquera que le carré sémiotique "ne permet pas seulement de voir quels sont les signifiés qui sont associés à un certain signifiant, mais permet aussi de structurer les signifiés en un système d'opposition [...] et rend les oppositions de signifié homologues aux oppositions de signifiant" ([Eco 88], Chap. 3, § 3.3)²⁴.

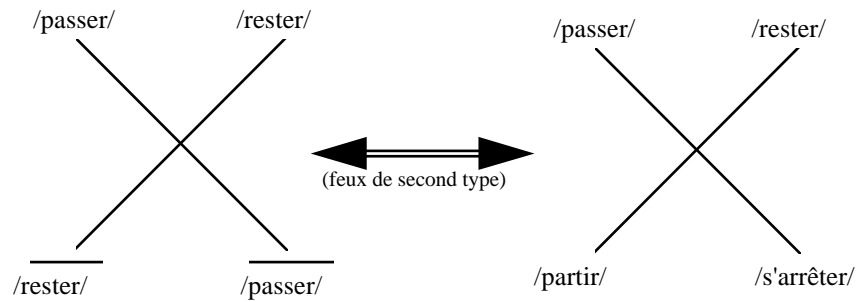


Figure 2.5 : Une connotation du système des feux de circulation

Les connotations sont innombrables, ce sont elles qui créent la richesse et la complexité des systèmes de connaissances. Ce sont elles qu'il est important d'identifier, ainsi que leurs processus de transformation ou génération. Ceci est très complexe, car comme le remarque Umberto Eco ([Eco 88], Chap. 3, § 3.6) - en prenant l'exemple des feux tricolores -, un système de connotation devient un système de dénotation pour une nouvelle connotation et ainsi de suite sur plusieurs niveaux. Nous allons, dans les paragraphes qui suivent, examiner quelques éléments qui permettent de rendre compte de cette complexité.

2.3.4. Les lois de composition des significations, l'exemple du groupe de Piaget

Pour contourner la combinatoire du sens, pour éviter un recensement mythique et exhaustif des connotations, pour garder un fil conducteur cohérent dans la description des connaissances, bref, pour tenter de maîtriser la complexité des significations possibles, il peut être utile de découvrir des lois "naturelles" qui permettent de construire de nouvelles significations à partir d'autres existantes, ou réciproquement, de décomposer des significations en significations plus fines. Ces lois peuvent expliquer aussi comment émergent et se complexifient les significations dans l'esprit humain. Il est donc naturel, pour obtenir quelques réponses, de se tourner vers la psychologie du développement dont l'objet est de révéler les mécanismes de formation de la connaissance, de l'intelligence, notamment chez l'enfant. C'est bien sûr Jean Piaget qui, dans ce domaine, est la référence obligée. Il est à l'origine des théories les plus originales, les plus formalisées et les plus cohérentes dans ce domaine (cf. par exemple [Tran-Thong 78]). Il est également un épistémologue de renom qui a marqué le développement de la science contemporaine.

Dans sa théorie du développement psychologique de l'enfant, Jean Piaget a constaté qu'au stade de la préadolescence, l'enfant se révèle apte à manier des concepts, sous la forme de propositions et d'utiliser des opérations propositionnelles inconnues de lui jusqu'alors : négation, implication, disjonction, exclusion etc. Au niveau cognitif, l'enfant est donc apte à construire, à découvrir, par des opérations logiques, de nouveaux concepts, de nouvelles significations. On va voir en fait, qu'à partir de connotations exprimées comme ci-dessus par des carrés sémiotiques, ce sont des opérations logiques élémentaires qui permettent de construire de

²⁴ Umberto Eco utilise une représentation (presque) équivalente au carré sémiotique et qui est aussi très courante : celle de matrices d'opposition, qui se présente ainsi :

	/passer/	/rester/
/rouge/	-	+
/vert/	+	-

nouvelles connotations sous forme de nouveaux carrés sémiotiques. On renvoie à [Ermine 89] pour la formalisation mathématique de ces notions.

Voyons ce qu'il en est selon Piaget. Citons un de ses exemples, assez proche de celui des feux de circulation ([Piaget 66]) :

"Prenons comme exemple l'implication (*p implique q*) et plaçons-nous dans la situation expérimentale où un enfant de 12 à 15 ans cherche à comprendre les liaisons entre des phénomènes qu'il ne connaît pas, mais qu'il analyse au moyen des opérations propositionnelles nouvelles dont il dispose, et non pas par tâtonnements au hasard. Supposons qu'il assiste à un certain nombre de mouvements d'un mobile et d'arrêts, ceux-ci semblant s'accompagner de l'allumage d'une lampe.

La première hypothèse qu'il fera est que la lumière est cause (ou indice de la cause) des arrêts : soit (*p implique q*) (lumière implique arrêt). Pour contrôler l'hypothèse, il n'est qu'un moyen : vérifier s'il existe ou non des allumages sans arrêts, soit (*p et q*) (négation de (*p implique q*)). Mais il peut se demander aussi si l'allumage, au lieu de provoquer l'arrêt, est déclenché par lui, soit (*q implique p*) (réciproque de (*p implique q*)). Pour contrôler (*q implique p*) (arrêt implique lumière), il cherchera le contre-exemple, c'est-à-dire des arrêts sans allumage (*p et q*) (négation de (*q implique p*)) qu'il exclura donc s'il en existe de tels où (*p et q*) qui est l'inverse (la négation) de (*q implique p*) est en même temps la corrélatrice de (*p implique q*) car si, toutes les fois qu'il y a allumage il y a arrêt (*p implique q*), il peut y avoir en ce cas des arrêts sans allumages. De même (*p et q*) qui est l'inverse de (*p implique q*) est aussi la corrélatrice de (*q implique p*), car si toutes les fois qu'il y a arrêt il y a allumage (*q implique p*), il peut y avoir en ce cas des allumages sans arrêts. De même si (*q implique p*) est la réciproque de (*p implique q*) alors (*p et q*) l'est aussi de (*p et q*).

On voit ainsi que, sans connaître aucune formule logique, ni la formule des groupes au sens mathématique [...], le préadolescent de 12-15 ans sera capable de manipuler des transformations selon les quatre possibilités.] (transformation identique), N (inverse ou négation), R (réciproque) et C (corrélatrice), soit dans le cas de (*p implique q*) (*p ou q*) :

$$I = (\overline{p} \text{ ou } q) \quad N = (p \text{ et } \overline{q}) \quad R = (p \text{ ou } \overline{q}) \quad C = (\overline{p} \text{ et } q)$$

Or $N=RC$ $R=NC$ $C=NR$ et $I=NRC$, ce qui constitue un groupe de quatre transformations ou de quaternarité réunissant en un même système les inversions et les réciprociétés et réalisant ainsi la synthèse de structures partielles construites jusque là au niveau des opérations concrètes.

Le stade de développement final de l'enfant en tant que tel est représenté par le groupe INRC dit encore groupe de Piaget. Ce groupe est un ensemble d'opérations qui, à partir de deux éléments p et q (deux traits sémantiques, par exemple ceux opposés dans un axe sémantique, pour ce qui nous concerne), permet de construire quatre nouveaux éléments. Ces opérations sont :

- La composition identique qui à p et q fait correspondre une notion composée qu'on notera p+q
- L'inversion qui à p et q fait correspondre $\overline{p+q}$
- La réciprociété qui à p et q fait correspondre $\overline{p} + \overline{q}$
- La corrélation qui à p et q fait correspondre $\overline{\overline{p+q}}$

Pour simplifier disons qu'à partir de deux significations p et q, les opérations de Piaget permettent de rendre compte de la naissance de nouvelles notions, composées avec p, q et leurs contraires \overline{p} et \overline{q} . La quaternarité des opérations permet de réinterpréter ces nouvelles notions dans des carrés sémiotiques, donc dans des nouvelles structures de signification. Nous avons vu l'exemple donné par Piaget lui-même. Nous allons donner un exemple similaire, toujours sur les feux de circulation.

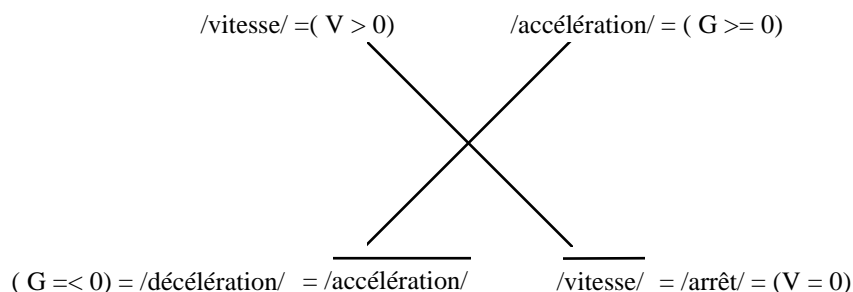


Figure 2.6 : Connotations intervenant dans les feux de circulation

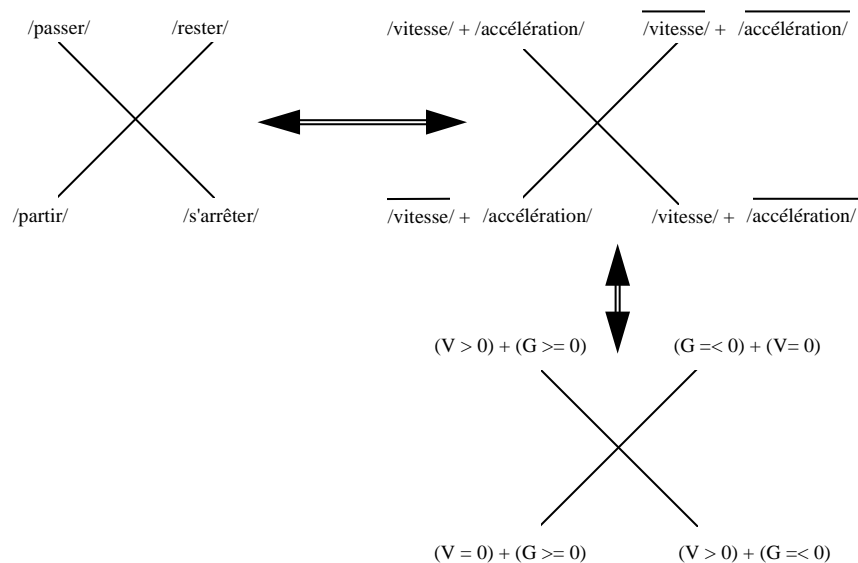


Figure 2.7 : Nouvelles connaissances connotées par le système des feux de circulation

Nous avons donné comme première connotation des feux de circulation, un carré qui opposait /passer/ à /rester/ et /partir/ à /s'arrêter/ (Figure 2.5). Une observation assez simple montre qu'on peut aller plus loin dans l'analyse et découvrir d'autres connotations. Il rentre dans les actions citées des connotations d'ordre physique évidentes qui sont les notions d'accélération et de vitesse : /passer/ connote une vitesse positive et une accélération positive ou nulle, /rester/ connote une vitesse et une accélération nulle, /partir/ connote une vitesse nulle et une accélération positive, enfin /s'arrêter/ connote une vitesse positive et une accélération négative. La connotation décrite par la figure 2.5 peut donc s'interpréter en faisant intervenir l'axe sémantique bien connu des physiciens /vitesse/ vs /accélération/ où /vitesse/ se comprend comme la grandeur vitesse V strictement positive, dont le contraire est compris comme la grandeur V nulle (donc la connotation /arrêt/), /accélération/ comme la grandeur accélération G positive ou nulle, dont le contraire est la grandeur G négative ou nulle (donc la connotation /décélération/). Tout ceci est résumé dans le carré de la figure 2.6.

En combinant, par les opérations de Piaget, les traits inscrits dans la figure 2.6, on obtient une interprétation composite plus fine de la signification primitivement attachée aux feux, et qui structure les observations qui viennent d'être faites. Ceci se traduit dans la figure 2.7.

2.3.5. Les niveaux de signification

Le processus de genèse des sens est bien évidemment complexe et multiple. Les mécanismes décrits ci-dessus, s'ils sont aptes à rendre compte de phénomènes ponctuels de sens, ne permettent pas une vision plus globale. Cette dernière, comme dans tout phénomène complexe, ne peut être atteinte qu'à travers un ensemble structuré de points de vue. La question se pose maintenant de savoir ce que peut être un ensemble structuré de point de vue sur la signification d'un système de connaissances.

La réponse, ou du moins une des réponses les plus pertinentes à ce jour, vient de l'anthropologie structurale et de l'apport remarquable et fondamental de l'œuvre de Claude Lévi-Strauss, qui a creusé dans cette discipline un énorme sillon qui continue de fertiliser les réflexions sur les systèmes humains. Cet apport déborde sur le troisième volet de l'ontologie de la connaissance présentée ici, puisqu'il aborde la connaissance comme une production sociale, donc dans son contexte. Cependant, sa coloration très fortement structuraliste, entièrement intégrée au formalisme qui vient d'être décrit, et son intégration au processus sémiotique (signification par rapport au destinataire) tel qu'il a été défini font qu'il se place naturellement dans l'étude de la notion de signification.

A côté de connotations qu'on peut exhumer à partir d'une analyse approfondie, il existe d'autres connotations qui ne tiennent pas à la nature propre du système étudié, mais appartiennent à des niveaux différents, cachés et multiples. L'analyse et la découverte de ces niveaux ne peut être, du moins au début, qu'un choix arbitraire, un "hasard", le principe organisateur ne se dévoilant que progressivement et renforçant

généralement les structures du départ, "comme cela se produit avec le microscope optique, incapable de révéler à l'observateur la structure ultime de la matière, on a seulement le choix entre plusieurs grossissements : chacun rend manifeste un niveau d'organisation dont la vérité n'est que relative, et exclut tant qu'on l'adopte la perception des autres niveaux" ([Lévi-Strauss] 64, Ouverture I).

La grande originalité de Claude Lévi-Strauss a été d'introduire les méthodes d'analyse structurale, telles que nous en avons esquissé une partie ci dessus, dans des phénomènes qu'on se contentait jusqu'ici de décrire, notamment les phénomènes humains, culturels ou autres. "Nous sommes conduit, en effet, à nous demander si divers aspects de la vie sociale [...] - dont nous savons déjà que l'étude peut s'aider de méthodes et de notions empruntées à la linguistique - ne consistent pas en phénomènes dont la nature rejoint celle même du langage" ([Lévi-Strauss 58] Chap.3). Il propose donc des analyses de ce type sur des phénomènes socioculturels divers, comme ses très célèbres études sur les systèmes de parenté dans les sociétés²⁵. La langue, plus généralement les messages divers qui peuvent être émis, sont corrélatifs d'une culture. Et s'il n'y a pas une correspondance exacte entre ces messages et cette culture, "certaines corrélations sont probablement décelables, entre certains aspects et à certains niveaux, et il s'agit pour nous de trouver quels sont ces aspects et où sont ces niveaux" ([Lévi-Strauss 58] Chap.4). C'est dans l'étude des mythes qu'il élabore une véritable méthode d'analyse structurale. Les mythes des sociétés primitives posent problème par leur obscurité apparente, leurs nombreuses variantes, la difficulté à élaborer, à travers eux, la vision du monde des indigènes²⁶. Pour Claude Lévi-Strauss, les mythes, (incluant toutes leurs variantes), relèvent d'un système symbolique, qu'il faut patiemment reconstruire derrière les messages. La reconstruction de ce système de signification se fait en recherchant des valeurs sémantiques nouvelles, différentes en général de celles véhiculées directement par le message (le langage) sur un nombre réduit de dimensions qui sont jugées pertinentes²⁷. On regroupe ensuite les dimensions sur quelques plans choisis : plan technique, plan sociologique, plan culinaire etc. et on recherche dans chacun des plans les organisations structurelles des valeurs sémantiques. En général cette dernière tâche se fait en identifiant les oppositions significatives - donc les carrés sémiotiques. C'est ce qui explique le titre (quelque peu provocateur !) d'un des livres les plus connus de Claude Lévi-Strauss : "Le cru et le cuit" où il articule un ensemble de mythes autour de l'opposition "cru vs cuit" sur le plan culinaire, en référant à d'autres oppositions homologues sur d'autres plans comme "vie vs mort" par exemple (on pourra à ce propos se référer à l'étude d'A.J. Greimas dans [Communications 66]).

La méthode de Claude Lévi-Strauss, surtout pour l'analyse des mythes, s'articule autour de trois notions fondamentales de la signification : l'*armature*, qui est l'agencement commun des unités sémantiques, ou encore l'ensemble des propriétés qui restent invariantes dans l'ensemble de mythes considéré, le *message* qui est le contenu d'un mythe particulier, et le *code* qui est une structure formelle d'unités sémantiques qui sont susceptibles d'engendrer les significations dans les différentes dimensions. On y retrouve, sous des dénominations différentes (dont il faut veiller à lever l'ambiguïté due à l'analogie), toutes les préoccupations qui ont été déjà soulevées dans la problématique de la signification. L'armature serait la structuration dénotative de base, commune à tous les systèmes considérés dans leurs variations, le message serait la signification particulière, due à diverses connotations, d'un système particulier, et le code serait l'ensemble des unités organisées dans une structure qui sera étudiée plus loin²⁸.

²⁵ "Les règles du mariage et les systèmes de parenté (sont considérés) comme une sorte de langage, c'est-à-dire un ensemble d'opérations destinées à assurer, entre les individus et les groupes, un certain type de communication" ([Lévi-Strauss 58] Chap.3)

²⁶ On remarquera que c'est exactement les mêmes problèmes pour un cogniticien face au discours d'un expert. Ceci explique que l'anthropologie ait fait une intrusion remarquée dans les technologies de la connaissance !

²⁷ "Eclairons par un exemple les concepts de "valeur" et de "dimension" : les termes de parenté français "père" et "mère" peuvent être définis au moyen de trois valeurs sur trois dimensions : valeur "première génération ascendante par rapport à ego" sur la dimension de la génération; valeur "en ligne directe" sur la dimension de la latéralité; valeur "masculin" pour père, "féminin" pour mère, sur la dimension du sexe" ([Sperber 68], Chap.2, §2)

²⁸ "A titre d'exemple, le code alimentaire pourrait être présenté, partiellement sous forme d'un arbre : "

Sans approfondir plus avant cette méthode, notamment l'analyse de mythes, car nous n'avons aucune compétence particulière en anthropologie, il est possible de se livrer à un petit "exercice amusant" pour illustrer cette démarche, en reprenant toujours le même exemple des feux de circulation. Considérons les feux de circulation comme un mythe moderne, qui se retrouve dans de nombreuses cultures, avec un certain nombre de variantes (on n'en considère ici que deux). La structure (l'armature) de base est donnée par les figures 2.3 et 2.4, sur laquelle s'articulent tous les messages possibles. Divers niveaux de signification ont déjà été étudiés, les niveaux qu'on pourrait appeler "niveau des opérations" (Figure 2.5) et "niveau des phénomènes physiques" (Figure 2.7). Il apparaît que ce sont des niveaux élémentaires de signification et bien d'autres niveaux d'interprétation peuvent être introduits de manière quasi infinie, ceci peut (doit) être fait en fonction des situations d'interprétation ou, plus généralement, en fonction d'une culture²⁹.

Pour illustrer ce propos, plaçons l'analyse des feux à un niveau qui pourrait s'appeler "niveau des injonctions" (ou niveau prescriptif) et montrons, qu'à travers une structure commune, les messages se transforment, révélés par les codes utilisés. Dans les feux de second type, l'interprétation à ce niveau s'articule de manière presque évidente sur l'axe sémantique /autorisation/ vs /interdiction/. Le feu vert indique l'autorisation de passer, le feu rouge l'interdiction de passer. Le feu orange qui est allumé simultanément au feu vert indique donc la non-autorisation de passer, et le feu orange qui est allumé simultanément au rouge indique la non-interdiction de passer, ceci est résumé dans la figure 2.8.

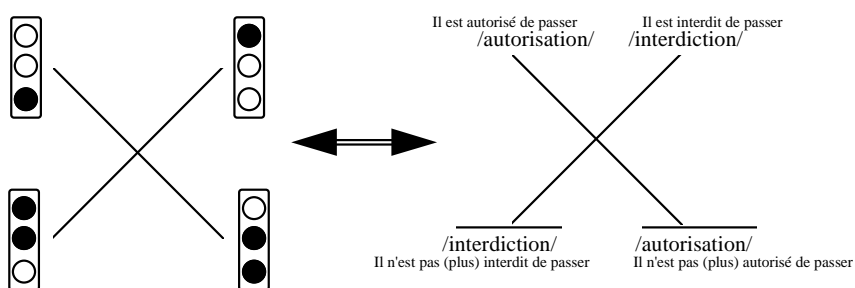
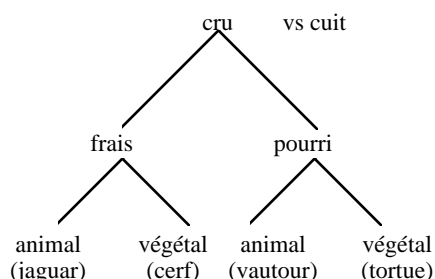


Figure 2.8 : Signification des feux de second type pour le "niveau des injonctions"



([Communications 66], Eléments pour une théorie de l'interprétation du récit mythique, A.J. Greimas). On retrouve la structure de réseau sémantique, organisant le code, qui sera abordée dans le paragraphe suivant.

²⁹ "Les axes sémantiques se restructurent continuellement en fonction des situations; mais il est nécessaire qu'ils existent pour qu'une signification s'élabore [...]. La culture est la manière dont, dans des circonstances historiques et anthropologiques données, le système se voit découpé, en un mouvement d'objectivation de la connaissance" ([Eco 88] Chap. 3, § 3.12)

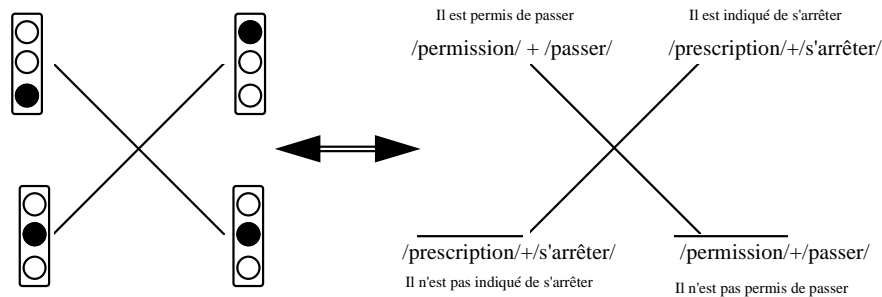


Figure 2.9 : Signification des feux de premier type pour le "niveau des injonctions"

On peut plaquer ce schéma de signification sur les feux de premier type, mais l'ambiguïté (voulue ?) de l'utilisation d'un feu orange unique permet une interprétation plus complexe. Dans une culture plus "permissive" et moins "soumise à l'autorité", comme c'est peut-être le cas de la culture française où intervient ce type de feux, l'interprétation ne s'articule pas autour de ce qui est interdit ou autorisé (et que corrélativement, il faut respecter), mais peut être autour de ce qu'il est indiqué de faire (ce qui n'implique pas une obéissance !) et ce qu'il est permis de faire. Ainsi un nouvel axe d'interprétation apparaît, qu'on peut noter par /permission/ vs /prescription/. Combiné avec les possibilités d'actions données dans la figure 2.5, selon les lois de Piaget, on trouve une signification très différente des feux de circulation : le feu vert indique dit qu'il est permis de passer (mais rien n'empêche de rester ou s'arrêter), le feu rouge indique qu'il faut s'arrêter (indication mais pas obligation, hélas), le feu orange signifie soit qu'il n'est pas (plus) permis de passer, si on le considère comme venant après le vert (et alors on cherche à s'arrêter), soit qu'il n'est pas encore indiqué de s'arrêter, si on le considère comme arrivant avant le rouge (et alors on cherche à passer). Cette interprétation, peu civique mais hélas répandue, est résumée dans la figure 2.9.

L'existence de différents niveaux d'interprétation, hiérarchisés au niveau de la complexité ou de l'appréhension, est une constante qui se retrouve souvent dans différentes sciences humaines. Un exemple frappant est donné par la psychanalyse. Pour reprendre l'idée de Jacques Lacan, pour qui "l'inconscient est structuré comme un langage", on peut émettre l'hypothèse que l'inconscient émet des messages qui sont perceptibles par des manifestations visibles, parfois anodines, qui ont été mises en évidence par Freud et ses disciples : des lapsus et jeux de mots jusqu'aux comportements les plus pathologiques. Ces messages forment la "couche syntaxique", le code, sur lequel se greffe une signification qui peut se décliner sur plusieurs niveaux. Pour illustrer clairement ce propos, on peut extraire un exemple d'un des livres fondamentaux (selon Lacan) de Sigmund Freud : "Psychopathologie de la vie quotidienne" ([Freud 19..], Chap. 8).

Il s'agit d'un médecin, sentimentalement attaché à un objet, un vase à fleurs, sans valeur mais très joli. Par un geste maladroit, qui ne lui ressemble pas, il le fait tomber en changeant l'eau des fleurs. Le vase se brise en quatre ou cinq morceaux. En les ramassant il se dit que les dégâts pourront être réparés en les recollant. A peine cette constatation faite, les morceaux ramassés lui échappent de nouveau des doigts, se brisant de nouveau, de manière définitivement irréparable. Une première interprétation de cet acte manqué (le "message de l'inconscient") peut être donné. Ce vase est, en effet, un cadeau d'une des patientes du médecin. Cette dernière lui avait fait nombre de présents, jusqu'à ce qu'elle se révèle atteinte d'une psychose. Conformément à sa déontologie, le médecin avait restitué ces cadeaux à la famille, sauf ce vase auquel il s'était attaché. Par ailleurs, il avait engagé, contre cette même famille, une procédure de recouvrement de dettes. L'acte manqué était donc une manifestation (et un moyen de résolution) de cette contradiction entre son appropriation "illicite" d'un bien de la famille et sa réclamation "licite" à la même famille.

Il s'agit donc bien là d'une "signification" du geste du médecin, et l'on pourrait, en exercice, déterminer aisément les axes sémiotiques qui structurent cette signification (on vient déjà d'évoquer, par exemple, la contradiction licite/illicite). Il n'y a aucune raison de mettre en doute cette interprétation qui est fortement pertinente et justifiée.

Cependant, Freud (en fait l'exemple est de L. Jekels) dégage un autre niveau de signification, d'appréhension plus complexe, mais tout aussi pertinent : l'acte manqué présente un niveau d'interprétation *symbolique*, étant donné que le vase constitue un symbole incontestable de la femme. "Le héros de cette petite histoire avait été marié; et sa femme, jeune jolie et qu'il adorait, était morte dans des circonstances tragiques. A la suite de ce malheur, il tomba dans un état de profonde neurasthénie, aggravée par le fait qu'il se considérait comme coupable de la mort de sa femme (j'ai brisé un joli vase). A partir de ce moment, il se tint à l'écart des femmes, ne voulut entendre parler ni de remariage ni d'aventures amoureuses, que son inconscient lui faisait apparaître comme des actes d'infidélité à l'égard de celle qu'il avait tant aimée, mais que son conscient refusait, en alléguant qu'il portait malheur aux femmes, qu'il ne voulait pas qu'une autre femme se suicidât à cause de lui, etc. (On voit qu'il ne devait pas conserver longtemps le vase !). Etant donné, cependant, l'intensité de sa libido, il n'y a rien d'étonnant qu'il vît dans les relations avec des femmes mariées le moyen le plus adéquat, parce que nécessairement passager, de satisfaire cette libido (d'où appropriation du vase appartenant à une autre personne).

Les deux faits suivants apportent une intéressante confirmation de cette interprétation symbolique : voulant guérir de sa névrose, il s'était soumis à un traitement psychanalytique. Au cours de la séance, alors qu'il racontait comment il avait brisé le vase en grès (terrestre), il en vint à parler de son attitude à l'égard des femmes et prétendit qu'il était exigeant jusqu'à l'absurdité : c'est ainsi, par exemple, qu'il exigeait des femmes une beauté "n'ayant rien de terrestre". Il avouait par là qu'il restait toujours attaché à sa femme (morte, donc ayant perdu toute nature terrestre) et ne voulait rien savoir de la "beauté terrestre"; d'où la destruction du vase en terre. Et à l'époque où, entré dans la phase du "transfert", il avait conçu le projet imaginaire d'épouser la fille de son médecin, il fit cadeau à celui-ci... d'un vase, comme pour montrer comment il pouvait prendre sa revanche du malheur qui lui était arrivé."

Voici donc un second niveau de signification pour interpréter le message fourni par l'acte manqué du médecin. Là encore, à travers le texte de Freud, on aperçoit aisément les axes sémiotiques (ou du moins une partie) qui peuvent structurer cette signification.

En conclusion de ce bref survol, on voit que la signification prend naissance dans une série de dénominations et connotations extrêmement diverses, qui font intervenir des unités élémentaires de sens, s'articulant dans des axes sémantiques ou des carrés sémiotiques, qui eux-mêmes prennent naissance dans des niveaux divers et variés, correspondant à de nombreux points de vue, rattachés le plus souvent à un contexte ou une culture. Il reste maintenant à dire comment, une fois les effets de sens engendrés, les constituants de la signification se stockent dans des structures qui constitueraient une mémoire sémantique.

2.4. Organisation de la signification

2.4.1. La mémoire sémantique

Le problème de la signification, comme nous avons pu le voir, est très lié, entre autres, à la psychologie cognitive. Les problèmes abordés ici sont les deux grands problèmes qu'elle se pose ([Caron 89], Chap. 4). Le premier est celui de la *sémantique psychologique* : quelle est la nature des significations ? C'est celui qu'on vient d'aborder ci-dessus, en essayant de l'extrapoler. Le second est celui de la *mémoire sémantique* : comment les significations sont-elles organisées en mémoire ?

La question du stockage des connaissances dans une mémoire sémantique est une question longuement débattue dans les sciences cognitives. L'idée même que des significations puissent exister et être stockées dans la mémoire pour être utilisées dans les processus de cognition constitue un courant d'idée, appelé cognitivisme, qui s'oppose à d'autres courants, comme par exemple le connexionnisme (cf. par exemple [Anderl 92] ou [Vergnaud 91]).

Le connexionnisme est une école de pensée fortement typée des sciences cognitives. Il est difficile d'en donner une définition précise en dehors des définitions très techniques des modèles mathématiques de neurones formels. Disons seulement que son hypothèse de base est que les phénomènes de cognition sont explicables (et quelque peu imitables) à partir de modélisations neuronales, inspirées de modèles de fonctionnement du cerveau élaborés par certaines branches des neurosciences. Une démonstration vivante et polémique de cette hypothèse est donnée par H. Dreyfus [Dreyfus 92] sur l'acquisition du savoir-faire et de l'expertise. Il l'explique par un processus d'apprentissage par l'exemple et par la reconnaissance de la ressemblance effectuée à travers un "réseau connexionniste" qui est un système fait de neurones interconnectés et architecturés par des lois mathématiques abstraites. C'est pour lui, la seule explication possible à la richesse, la diversité et la rapidité des résolutions de problèmes d'un expert. Ainsi, la connaissance serait à la limite réductible à la constitution d'une base de cas, (élaborée dans une structure non nécessairement signifiante vis à vis d'une perception qu'on pourrait en avoir), de processus complexes d'apprentissage et de reconnaissance s'effectuant dans des systèmes formels. Le problème de la constitution d'une mémoire sémantique, au sens où on l'entend ici, s'éloigne donc. Il existe bien sûr des hypothèses moins tranchées essayant de développer hiérarchiquement des niveaux successifs d'abstraction de connaissances, qui aboutiraient à la perception intuitive de la notion de connaissance [Descles 91].

Le cognitivisme est une autre école de pensée dans les sciences cognitives qui s'oppose souvent (parfois violemment !) à l'école connexionniste. Il semble cependant que la discussion est largement ouverte et que des points de complémentarité sinon de convergence apparaissent. Cette école est plus proche de la problématique exposée ici, puisqu'elle est basée sur des représentations de la connaissance. Selon le cognitivisme, la connaissance est un *ensemble de symboles* qu'on peut manipuler de manière "computationnelle". Traiter la connaissance, c'est donc établir ces systèmes de symboles et les opérations qui permettent de les manipuler. Il y a différents problèmes qui se rattachent à cette hypothèse. On peut en énoncer rapidement quelques uns. D'abord le choix du système de représentation, qui peut aller du langage naturel à des langages abstraits de la logique mathématique, ou bien d'autres systèmes de signes. Ensuite, le rapport de ces représentations à des entités

"externes" auxquelles elles sont censées se rapporter. Enfin, la puissance sémantique d'interprétation de ces représentations : dans quelle mesure fournissent-elles des modèles interprétables ou compréhensibles (et par qui?) de la connaissance? Ces problèmes, déjà abordés au moins partiellement, se recourent directement avec celui de la mémoire sémantique.

La notion de mémoire sémantique a été introduite par Quillian en 1967 ([Quillian 1967]). Elle a eu diverses acceptations, et maintenant tend à recouvrir le contenu de la notion classique en psychologie de "mémoire à long terme". On s'entendra à définir la mémoire sémantique, en suivant J.-F. Le Ny ([Le Ny 89] Chap. 3) comme une organisation d'un ensemble de représentations (de connaissance) qui présentent un caractère de *relief* (comparable à la notion de *saillance* de R. Thom³⁰) et une certaine *stabilité dans le temps* (représentations à long terme). Trouver un modèle de la mémoire à long terme consiste donc à trouver des représentations de connaissances qui ont une pertinence psychologique et une adéquation prouvée avec la mémoire humaine, d'où l'importance fondamentale des innombrables expériences qui ont validé les modèles qui vont être présentés ici.

Il existe essentiellement deux modèles de structures sémantiques mentales, qu'on appelle les *modèles en réseau* et les *modèles à propriétés ou à traits* (cf.. par exemple [Caron 89], Chap.4, § 3) Ces modèles, loin d'être incompatibles, peuvent s'obtenir ou se transformer par des relations d'équivalence. Dans le vocabulaire de représentation de connaissances, on parle en général de *réseaux sémantiques* et de *représentations objet* (ou à objets ou par objets etc.).

2.4.2. Les modèles en réseau : les réseaux sémantiques

Ces modèles ont été conçus et expérimentés pour la première fois par Collins et Quillian ([Collins 69], [Collins 70]), ils ont depuis fait l'objet d'innombrables travaux et formalisations, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle (cf.. par exemple [Sowa 91]).

Un réseau sémantique est un formalisme de représentation de la connaissance dont la caractéristique de base est d'utiliser des nœuds et des arcs (orientés ou non) pour représenter le domaine : d'une manière générale, les nœuds représentent les objets, les éléments etc. et les arcs les relations entre ces éléments. Un des intérêts principaux de ce formalisme est la capacité d'atteindre à partir d'un point du réseau toutes les informations conceptuellement associées au point. Ce formalisme, apparemment simple a rapidement posé de nombreux problèmes. Très vite, les nœuds ont désigné non pas des éléments mais des classes d'éléments. Apparaît alors la notion de sous-classes qui peut se comprendre à plusieurs niveaux : ensemble/sous-ensemble, généralisation/spécialisation, inclusion conceptuelle ou encore appartenance, instanciation etc., d'où un certain nombre d'étiquettes pour les arcs désignant ce genre de relations : isa (pour "is a" : "est un"), ako ("a kind of" : "une sorte de"), member of ("membre de"), instance of ("instance de") etc.

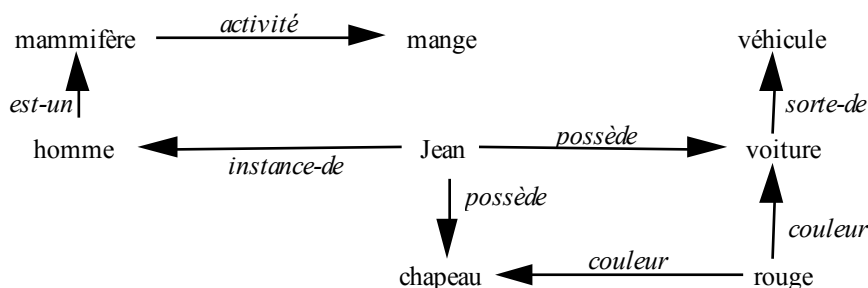


Figure 2.10 : Réseau sémantique décrivant l'assertion :
"Jean a une voiture et un chapeau rouges"

Outre les problèmes des dénominations des arcs, intervient le fait que parfois il est difficile de distinguer quel doit être le nœud et quel doit être l'arc (où est le concept, où est la relation ?). En fait les arcs peuvent désigner les attributs d'un nœud. Par exemple, le réseau de la figure 2.10 décrit un certain nombre de relations et

³⁰ "J'appellerai *forme saillante* toute forme vécue qui se sépare nettement du fond continu sur lequel elle se détache" ([Thom 88] Chap. 1)

de règles implicitement comprises dans la phrase: Jean a une voiture et un chapeau rouge, qui font référence au monde de l'énonciateur par exemple : Jean est un homme, un homme est un mammifère, un mammifère mange (donc Jean mange) etc. On peut voir ici que la sémantique des arcs n'est pas précise en toute généralité (une voiture est "une sorte de" véhicule mais l'homme "est un" mammifère). De même "possède" est l'étiquette d'un arc, on peut imaginer que "possession" devient un nœud lié à homme par l'arc "est capable de" etc. De plus si la connaissance se complique le réseau peut devenir très complexe, voire impossible à expliciter.

Après des polémiques célèbres sur le contenu des nœuds et des arcs (cf. par exemple [Brachman 77]), de multiples tentatives ont été faites, pour définir de manière précise et fondée la sémantique de tels réseaux. On s'est alors éloigné des préoccupations de la psychologie cognitive pour aborder des problèmes propres à l'intelligence artificielle ou à l'informatique plus classique en établissant de véritables langages (au sens formel) de représentation des connaissances ([Sowa 91]). Les réseaux sémantiques décrivent souvent maintenant des liens entre concepts de nature hiérarchique, revenant à la signification première qui leur avait été assignée pour modéliser la mémoire sémantique : décrire "l'effet de "distance hiérarchique" entre catégories concernées, tel qu'il se manifeste sur les temps de jugement" ([Le Ny 89] Chap. 2). Pour revenir à notre exemple, on peut organiser en réseau sémantique hiérarchisé les types d'action conduite qu'on peut s'attendre à rencontrer à une intersection routière (figure 2.11).

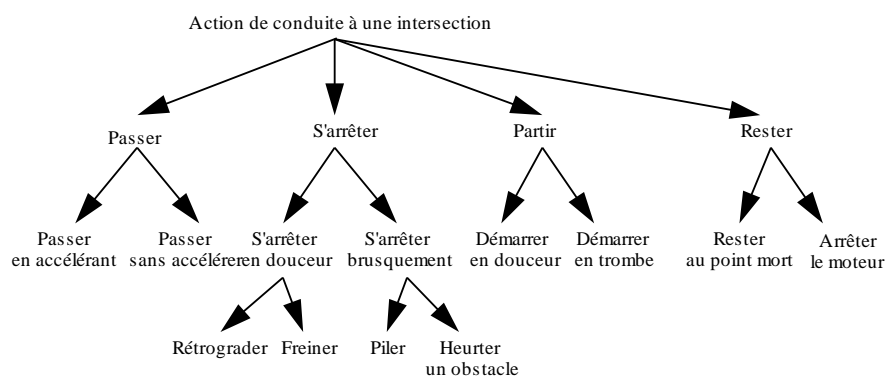


Figure 2.11 : Réseau sémantique de type généralisation/spécialisation pour les connaissances sur les conduites aux intersections

En comparant la figure 2.11 avec les figures 2.5 et 2.7, on peut remarquer qu'on utilise bien sûr les mêmes analyses en traits sémantiques, qui ont abouti à la découverte de concepts par des processus qui ont été élucidés dans les paragraphes précédents. Mais le stockage de ces concepts, de ces traits, (destinés à être réutilisés dans des procédures de traitement des connaissances), s'effectue selon une manière originale, suivant des modèles (ici en réseaux) censés représenter la mémoire sémantique humaine. On retrouve bien ici deux fonctions fondamentales complémentaires qui caractérisent psychologiquement les phénomènes intellectuels : la découverte et le stockage des concepts³¹.

2.4.3. Les modèles à traits ou propriétés : les représentations objet

Les modèles en réseau sont basés sur l'hypothèse que la mémoire sémantique est de type associatif. Depuis quelques années, et particulièrement dans certains milieux (informatique, intelligence artificielle...), un autre mode de représentation tend à se développer, qui est beaucoup plus "granulaire" : les modèles à traits (ou propriétés), qu'on nomme dans les milieux cités ci-dessus, modèles objet.

Si les modèles en réseau supposent que le monde nous apparaît comme un réseau de concepts liés entre eux par des liens typés sémantiquement, les modèles objet supposent que "le monde nous apparaît sous la forme d'un agencement d'objets" ([Ganascia 90] Chap.4 § 4.3). Ces objets sont définis par des traits qui sont des représentations composantes, qui elles-mêmes peuvent être des composantes d'autres représentations, et qui soit

³¹ Les trois processus de base de tout système de mémoire, naturel ou artificiel sont : encodage, stockage et récupération. On pourra consulter pour un survol pertinent de ces questions, l'excellent numéro spécial de "La Recherche" sur la mémoire : [La Recherche 94]

sont terminales (elles ne se décomposent pas), soit peuvent se décomposer en d'autres traits³². Ces traits sont "les capacités discriminatives les plus pertinentes qu'un individu est capable de mettre en œuvre, compte tenu du monde physique et de la société dans lesquels il vit" ([Le Ny 89] Chap. 2), ce sont donc des éléments psychologiques traduisant notre perception des objets qui nous entourent. C'est sans doute dans un article célèbre de Marvin Minsky, pour l'étude psychologique de la vision ([Minsky 75]), qu'ont débuté les tentatives de formalisation de ce type de modèle. Repris depuis sous bien des aspects, ces modèles sont devenus de véritables langages, extrêmement formels, notamment en informatique (on pourra en voir une brève introduction dans [Ermine 89], Chap. 1.4, § 6 et un développement plus complet dans, par exemple, [Masini 90]).

L'idée d'objet en psychologie cognitive s'est fondée sur une analyse fine des notions de traits sémantiques, à laquelle on a substitué l'idée de couple *attribut-valeur* ([Le Ny 89] Chap. 3). En effet, si l'on considère, par exemple, les lampes d'un feu de circulation on peut associer à chacune d'elle le trait /rouge/, /vert/ ou /orange/. (ou la propriété a-une-couleur-rouge etc., d'où l'intitulé pas très approprié de "modèles à propriétés"). Cette connaissance se décompose elle-même en deux autres connaissances : les lampes ont une couleur (couleur est alors appelée un *attribut* de la lampe), cette couleur est rouge, vert, ou orange (ce qu'on appelle des *valeurs* de l'attribut couleur). L'idée de considérer un trait sémantique sous ce double aspect, celui des attributs et des valeurs d'attributs s'est révélée extrêmement productive pour une théorie compositionnelle. Elle a permis de rendre compte d'un grand nombre de phénomènes psychologiques : relief (ou poids) différents des traits d'une représentation (en situation provisoire ou non), traits figuratifs ou non figuratifs (un attribut figuratif - comme "couleur" par exemple - est un produit direct de la perception, contrairement à un attribut non figuratif - comme "danger" - produit d'une abstraction, confusion conceptuelle courante entre attribut et sa valeur (quand on dit par exemple "Il surveille constamment la vitesse de sa voiture", c'est effectivement l'attribut vitesse qui est en cause, quand on dit "la vitesse de la voiture l'a empêchée de s'arrêter", il s'agit de la valeur trop élevée de l'attribut vitesse) etc. Des liens avec les récentes connaissances en neurobiologie sur la nature de l'élément récepteur et cérébral renforcent encore la richesse de ce concept ([Le Ny 89] Chap. 3). Ainsi, la notion d'attribut devient un élément de base pour la représentation de connaissances sous des modèles qu'on appellera désormais des *modèles objet*³³.

Objet : **Feu de circulation** :

Lieu géographique = {Chaîne de caractères}
 Numéro = {1..40}
 Type de lampe = {Type de lampe}
 Positionnement = {angle du carrefour, suspendu au milieu
 de la chaussée,...}

Objet : **Type de lampe** :

Couleur : {rouge, vert, orange}
 Diamètre : {Entier cm}
 Luminosité : {...}

Exemple d'instance de Feu de circulation :

Lieu géographique = {Place de l'étoile, Paris}
 Numéro = 16
 Type de lampe =
 {Couleur = rouge Diamètre = 30 cm Luminosité = forte}
 {Couleur = orange Diamètre = 25 cm Luminosité = moyenne}
 {Couleur = vert Diamètre = 25 cm Luminosité = moyenne}

Positionnement = angle du carrefour

³² "Dans un modèle à traits, une représentation conceptuelle peut dès lors être considérée comme un ensemble organisé de représentations plus élémentaires, c'est-à-dire d'informations durables, stockées en mémoire à long terme, dont la fonction est de constituer des supports de discrimination, susceptibles d'être mis en œuvre pour faciliter de multiples activités, instantanées ou à court terme, de discrimination, dans la perception, le rappel, la pensée, la compréhension du langage etc." ([Le Ny 89] Chap. 2)

³³ "Un attribut est un mode d'organisation particulier et fondamental des représentations élémentaires; il reflète une relation d'opposition/similitude entre ses valeurs, grâce à laquelle il peut servir, en effet, de support cognitif aux qualifications des objets" ([Le Ny 89] Chap. 3)

e
tc.

Figure 2.12 : Exemple de représentation objet d'un feu de circulation

Qu'est-ce qu'un modèle objet ? Un objet est une entité perçue dans l'environnement du modélisateur. Sans rentrer dans des détails techniques, disons qu'un *objet* (ou plutôt une *classe* d'objets) est vu comme une collection d'*attributs* (les "traits" ou plus improprement, les "propriétés") qui en sont sa définition. Ces attributs ont une plage de valeurs, et peuvent être valués pour créer une *instance* particulière de cet objet. Ainsi, un feu de circulation est défini par exemple par le lieu géographique où il se trouve, un numéro (il y a plusieurs feux en général sur un lieu), le type des lampes qui le composent (cet attribut est multivalué puisqu'il y en a trois en général), son positionnement (sur l'angle, suspendu au milieu de la chaussée) etc. Le type de lampe est un autre objet composé, puisqu'il est défini par sa couleur (rouge, vert, orange), son diamètre (parfois plus grand pour la lampe rouge), sa luminosité etc. On pourrait encore dire que l'attribut couleur est encore un objet composé, puisqu'il peut être défini par trois attributs (ses niveaux de rouge, vert, bleu dans un système de codage des couleurs par exemple, cf. chapitre 1), ceci relève de la responsabilité du modélisateur. On obtient ainsi une description "raisonnable" et structurée des différents aspects de l'objet feu de circulation (figure 2.12).

On le voit donc, les modèles objet privilégient les listes d'attributs ou propriétés ("traits") enregistrés avec le concept en question, alors que les modèles en réseau privilégient l'ensemble des relations que le concept entretient avec les autres concepts. Cependant, comme on l'a déjà souligné, ces deux approches ne sont pas incompatibles. Ainsi, les modèles objet sont généralement intégrés dans un modèle en réseau qui rend compte d'un lien fondamental qu'on appelle l'*héritage*. L'héritage, de manière pratique, est un lien qui permet d'affecter à des sous-catégories d'une catégorie donnée, des attributs (ou des valeurs d'attributs) de la catégorie supérieure. C'est une procédure, reposant sur une propriété structurale (de type taxinomique) du domaine, qui, si une telle structure existe, se révèle extrêmement féconde. Elle permet notamment de structurer en réseau un domaine découpé en objets. Par exemple, on doit sûrement pouvoir déterminer un réseau structurant l'ensemble des feux de circulation en fonction de leur différentes caractéristiques (leurs attributs). L'objet le plus général de ce réseau serait un objet (conceptuel, n'ayant pas nécessairement d'existence physique) qui regrouperait toutes les caractéristiques communes à tous les feux de circulation (on en imagine aisément), et les sous-catégories affinaient successivement cet objet en rajoutant des caractéristiques particulières pour permettre d'inclure dans cette structure toutes les variétés de feux existant sur le marché. Notre connaissance précise sur ce domaine étant très limitée, nous nous garderons bien de fournir un tel réseau !

2.5. La signification : mythes et limites

Tout au long de ce chapitre, la dimension sémantique d'un système de connaissances a été ramenée à au processus de signification dans un système sémiotique. On a pu voir la richesse considérable d'une telle approche. Elle est incontournable pour toute méthodologie de gestion des connaissances, et ce serait une grave erreur, à notre sens, de reléguer les approches sémiotiques à des techniques surannées qui n'auraient plus rien à apporter. Dans des domaines comme l'informatique, l'intelligence artificielle, le génie cognitif, il n'est jamais trop tard pour introduire des techniques fournies par les sciences humaines, même si celles-ci sont contestées au cœur même de leur propre discipline (l'exemple révélateur est celui de la linguistique de Chomsky des années 50 qui est toujours fondamentale dans la théorie moderne des langages informatiques et qui se porte beaucoup moins bien dans les théories linguistiques actuelles).

Cependant, les débuts euphoriques, les avancées rapides, dus aux premiers résultats de la sémiotique, ou même plus généralement aux approches structuralistes se sont estompés. Comme de bien entendu, des limites ont été atteintes, des excès ont été commis. L'approche est remise en cause dans ses fondements, d'autres hypothèses sont mises en avant, qui subiront, sans aucun doute, le même cycle d'évolution. Ce n'est pas tant que les hypothèses posées soient fausses, elles sont seulement recadrées et les bornes posées pour délimiter les contours de la théorie présupposent d'autres extensions qui restent à explorer. Ceci permet en tout cas de travailler sereinement, sans impérialisme idéologique, dans un cadre méthodologique dont on connaît les contraintes et les limites. Nous en esquissons ici quelques unes. On pourra consulter à ce propos l'excellente introduction, intitulée "L'empire des signes (la sémiotique)", à la limite du pamphlet humoristique, qu'a rédigée Daniel Bougnoux au chapitre II de son ouvrage ([Bougnoux 93]).

2.5.1. *L'arbitraire du code*

Dans le codage de l'information, le bit est une unité de codage unique. Dans des systèmes tels que les systèmes phonétiques, un ensemble restreint de codes (les phonèmes) suffit à coder l'ensemble du système langagier. Il n'en est évidemment pas de même dans un système sémantique complexe, où la "constitution d'un code complet doit rester au stade d'hypothèse régulatrice" ([Eco 72] Sec A, Chap. 2, § XIII.4). En fait toute découverte de traits sémantiques explicitant une certaine signification est un événement entaché d'arbitraire, réalisé à l'occasion de l'étude des conditions de circulation d'un message donné ou d'une connaissance particulière. Ce n'est pas une réalité en soi, mais un outil opératoire qui ne peut prétendre à l'universalité³⁴.

La "sémiotisation" d'une entité quelconque est donc nécessairement une simplification entachée par l'arbitraire né du projet de modélisation. Il est donc fondamental de garder dans l'esprit ce projet qui est "l'éminence grise" qui sous-tend toute analyse sémiotique, toute élaboration d'objets, de réseaux, et qui est le seul garant de la cohésion des modèles établis (ne parlons pas ici de cohérence, qui suppose qu'un modèle "universel" de référence existe). En d'autres termes, il faut bien être conscient qu'il n'existe pas une représentation des connaissances sur un sujet donné, mais des représentations qui ont toutes une pertinence qu'il faut nécessairement spécifier pour garantir un projet cohérent (il n'y a pas, dans la langue française, d'adjectif correspondant à cohésion !) basé sur la connaissance en jeu.

2.5.2 *La multiplicité des codes et les circonstances extra-sémiotiques*

" Il devrait être clair maintenant que le modèle initial de communication qui prévoyait un code commun à l'émetteur et au destinataire était bien sommaire. La multiplicité des sous-codes qui traversent une culture nous montre que le même message peut être décodé sous divers points de vue et en recourant à des systèmes de convention divers " ([Eco 72] Sec. A, chap. 2, § XIV.1). Le codage du sens par les signes porte donc en lui-même sa propre limitation, car outre l'arbitraire du codage cité ci-dessus, on s'aperçoit qu'il n'y a pas de bijection entre une signification et un codage, et que le codage ou décodage du sens subit des lois qui sont extérieures au processus sémiotique de signification tel qu'il a été défini ici. C'est le problème du contexte, de la pragmatique, qui entre en ligne de compte et qu'on abordera au chapitre suivant. En fait, le message sémantique, une fois codé reste encore ambigu, et est susceptible de plusieurs interprétations possibles, et ceci pour des raisons extra-sémiotiques. Ces raisons peuvent être propres au contexte (*l'univers du discours*), qui peut être traité par ailleurs, éventuellement par une approche similaire. Mais l'ambiguïté d'un message sémantique peut être aussi une faiblesse inhérente à l'approche considérée (par exemple l'impossibilité de prendre en compte la *circonstance* de la communication, qui échappe - notamment selon Fodor et Katz - à la théorie sémantique). En effet, les méthodes sémiotiques sont caractérisées par ce qu'on appelle la "clôture sémiotique", qui suppose qu'en décrivant un objet (culturel) par un système de signes, on mette entre parenthèses sa référence pour ne s'intéresser qu'à sa seule signification³⁵. La circonstance traduit le retour de cette référence qu'on a voulu éliminer méthodologiquement, pour pouvoir raisonner et comprendre dans l'abstraction (la "sémiosphère"), afin d'être plus libre, plus fécond, plus détaché, plus critique. Cependant la sémiosphère est inéluctablement rattachée à la biosphère et on ne peut en faire un monde clos. Par exemple, on peut parier qu'aucun système sémantique ne nous fournira une solution rationnelle au tragique problème des accidents de la circulation, en nous expliquant pourquoi tel être humain, conduisant en état d'ivresse, s'arrête au feu rouge et pas tel autre ! Il faut chercher ailleurs que dans les signes des explications à des phénomènes profondément enracinés dans l'humain³⁶.

2.5.3 *La simplification des modèles de communication*

Comme on l'a déjà signalé de nombreuses fois, le processus de signification est fortement imprégné du modèle de communication de l'information, avec un émetteur/codeur, un canal de transmission, un récepteur/décodeur. C'est une des grandes limitations de ce genre d'approche, car il simplifie parfois trop fortement l'analyse qu'on peut faire. Une illustration très pertinente de cette restriction est faite par Dan Sperber

³⁴ " Dès que l'on affirme qu'une sémiotique du code est possible, on reconnaît son caractère partiel et révisable. [...] C'est en assumant la conscience de ses propres limites sans prétendre à être un savoir absolu que la sémiotique pourra devenir une discipline scientifique" ([Eco 72] Sec A, Chap. 2, § XIII.4)

³⁵ "les signes ne dénotent pas directement les objets réels" ([Eco 72] Sec. A, chap. 2, § XIV.4)

³⁶ "Cette inflation en tous domaines (l'inflation des signes est l'inflation par excellence) a suscité le dégoût légitime de quelques-uns : assez décodé ! [...] et de citer Michel Serres ' Le sens se gagne en marchant. Assez de discours, des actes, dans le discours même. Trop de critique : des oeuvres ! Ce qu'on nomme théorie offre toujours le maximum de facilité avec le minimum de vocabulaire' " ([Bougnoux 93] Chap. 2)

([Sperber 68]) dans sa critique des travaux de Claude Lévi-Strauss (chapitre 3 : Systèmes et modèles de communication).

Sperber distingue des structures de code et des structures de réseau. Les premières régissent un ensemble de messages, en distinguant de manière nette le code du réseau de transmission. L'exemple type est le télégraphe où "on pourrait modifier le code à l'envi sans affecter le réseau, et bouleverser le réseau sans toucher au code". Les secondes structures régissent un ensemble d'échanges, où ce qui est communiqué est intimement lié à la situation de communication. L'exemple type est le code de la politesse, qu'il faut toujours analyser comme affectant circonstanciellement certains messages à certains canaux. Selon Sperber, les méthodes structuralistes, comme celles qui ont été décrites ici, n'ont jamais tenu compte des systèmes de réseau. Elles ont toujours considéré, comme hypothèse de base, que tout système "est structuré comme un langage" sur le modèle du télégraphe, code et réseau ayant chacun leur logique propre. Il est clair que dans des systèmes complexes comme les systèmes de connaissances, ou plus généralement les systèmes socioculturels, cette hypothèse est très restrictive, car ces systèmes ne règlent pas seulement la formation des messages (comme le langage), mais aussi leur circulation. Les choses se compliquent alors : canaux et messages dépendent les uns des autres et on ne peut isoler ou dissocier des ensembles homogènes. Les méthodes d'analyse du sens héritées des théories du signe trouvent donc là leur limite. Il n'est pas étonnant qu'on les ait atteintes dans l'analyse de systèmes tels que le politique et le rituel. De tels systèmes, et c'est presque du bon sens populaire que de l'affirmer, sont réfractaires à toute réduction à un système de signes signifiants. Il est clair qu'il faut dépasser le schéma de l'information ou de la signification pour rendre compte des phénomènes profonds qui régissent de tels systèmes. Existe-t-il d'autres grilles d'analyse ? De manière optimiste, on est en droit de penser que oui. Dan Sperber termine son analyse par une touche d'espoir : "Structures de code et de réseau apparaissent comme des cas très particuliers, même si la théorie mathématique de la communication leur a porté un intérêt exclusif [...]. Parmi les nombreux problèmes qui subsistent dans ces domaines mêmes, il en est certains qui ne trouveront sans doute leur solution qu'à partir de modèles généraux". Il ajoute, sans doute par rapport à son lectorat potentiel : "Aux anthropologues de susciter une mathématique adéquate à leur objet". Gageons (et espérons !) que ceux-ci ne seront pas les seuls à se consacrer à cette tâche !

Connaissance et contexte

Aspects structurels

3.1. Introduction

Lorsqu'on a extrait d'un ensemble de connaissances données les informations et leurs significations, il reste malheureusement souvent bien des choses encore inexpliquées. On peut toujours invoquer des capacités de stockage ou traitement d'informations insuffisantes ou des analyses cognitives trop partielles, force est de constater que les dimensions informationnelles ou cognitives des connaissances sont insuffisantes à décrire leur richesse dans leurs fondements même. Comme cela a été signalé depuis bien longtemps, la dimension pragmatique est particulièrement présente dans ce domaine, et on n'en prendra pour preuve que la phrase mainte fois prononcée : "Cela dépend du contexte", quand une connaissance résiste à toute identification et à toute analyse sémantique.

Il s'agit donc maintenant de définir la composante contextuelle de la connaissance, à savoir ce qui rend compte d'une perception complémentaire des éléments informatifs ou sémantiques. Il s'agit essentiellement d'une perception globale, qui n'arrive pas à se réduire à une décomposition du sens ou de l'information et qui échappe donc aux théories atomisées ou componentielles telles que celles de l'information ou de la sémiotique. Elle identifie plutôt une sorte d'*environnement enveloppe*, qui donne toute la richesse aux données et à leurs significations. Le problème est donc de savoir s'il est possible de définir un objet général capable d'englober tout système de connaissances, tout en conservant la potentialité de tous les points de vue qui pourraient se dégager sur l'ensemble de ces connaissances.

Le problème s'apparente donc, à première vue, à une gageure : pouvoir rendre compte d'une sorte de totalité sans maîtriser la luxuriance et la variété de toutes les parties susceptibles d'y être découvertes. C'est ce qui explique que les problèmes de contexte arrivent toujours en phase terminale, après qu'on ait épuisé la diversité des autres aspects (ce qui explique aussi qu'on est alors dans l'incapacité de résoudre ces problèmes !). Prendre le problème à l'envers est-il raisonnable ? Cela implique en tout cas une certaine rupture avec la vision traditionnelle de l'analyse et de la modélisation : la réduction en bits ou en sèmes est trop réductionniste pour rendre compte du problème, la méthode analytique trouve donc là ses limites. Nous allons essayer de montrer dans la suite, que la méthode systémique, qui se veut complémentaire, peut apporter quelques éléments à la problématique de l'ontologie du concept de contexte. La vision systémique ambitionne justement de fournir des outils de modélisation qui permettent non pas d'exhiber explicitement des structures, mais de dégager une intelligibilité permettant de comprendre dans son ensemble le système étudié (ici un système de connaissances). L'intelligibilité ne mutile pas la vision des systèmes, tout en en conservant la complexité.

Il sera donc question ci-dessous de considérer la connaissance (les connaissances) comme un système, au sens de la théorie du Système Général. Cette hypothèse de départ comporte cependant quelques ambiguïtés : comme les connaissances en jeu portent toujours sur un domaine donné, s'agit-il d'avoir une vision systémique sur ce domaine (ce qui donnerait une aisance certaine dans la manipulation du concept de contexte), ou sur l'ensemble des connaissances (ce qui paraîtrait plus conforme à la notion intuitive de contexte) ? On montrera ci-dessous que les deux problèmes sont intimement liés et constituent deux visions cohérentes du concept de contexte.

Plutôt que de contexte à proprement parler, il est préférable d'évoquer la *mise en contexte* des connaissances, car il n'est question que de la connaissance, qui est notre point de mire. Se lancer dans une ontologie générale du concept de contexte, donc de la pragmatique, paraît trop loin de nos préoccupations (et nos possibilités !). De plus, la mise en contexte est bien le problème, puisque c'est ce qui complète indubitablement toutes les analyses sur les données et leurs significations : si celles-ci ne sont pas (re)mises dans leur contexte, elles perdent beaucoup de leur valeur. Avec cette dénomination, le problème évoqué ci-dessus prend un nouvel éclairage. La mise en contexte dans un système de connaissances devient un phénomène de *circulation des connaissances* : dans quel "contexte" les connaissances sont-elles transmises ? La réponse à cette question peut amener à répondre à la question : comment les connaissances peuvent-elles être comprises ? Ce qui est l'essence même des questions de contexte. La mise en contexte d'un système sur lequel on a des connaissances devient un phénomène de vision englobante : comment peut-on décrire de manière "générale" un

ensemble sur lequel on possède des connaissances ? De même, la réponse à cette question peut amener à répondre à la question : dans quel cadre (contexte) se situent les connaissances en cause ? Ce qui est aussi une autre manière de poser le problème du contexte.

3.2. Un modèle de circulation des connaissances

Pour introduire les aspects ontologiques de l'information et de la signification, il a fallu aborder certains côtés de l'aspect génétique de ces notions. En effet, "l'objet information" n'est réellement compréhensible qu'à travers le modèle de sa transmission : de la naissance (via le codage) à sa propagation (via un canal bruité) vers sa réception (via un décodage). De même, "l'objet signification" n'a été défini qu'à travers un processus sémiotique, qui est un processus cognitif de génération et organisation de structures sémantiques. Ce processus sémiotique est de même nature que celui de la transmission de l'information avec une très forte concentration sur l'élaboration des codes de la signification, qui est une fonction dite référentielle ou cognitive (§ 2.2.3.).

La fonction cognitive d'un système de connaissances (de signes) fait déjà largement référence au contexte (ou encore situation ou patrimoine de connaissances). Cependant, son asservissement au modèle de transmission de Shannon en pose les limites, comme nous avons pu le voir. Par là, le "contexte" n'apparaît que de manière incantatoire, rejetant un certain nombre de problèmes fondamentaux dans un ailleurs inconnaissable, à la limite, dénué d'intérêt. Mais c'est sans compter sur la ténacité de la réflexion humaine !

La connaissance sur les composantes autres que celles informationnelles ou cognitives dans un système a beaucoup progressé avec les approches globales de la systémique qui ont apporté de nouvelles visions sur les phénomènes qu'on continue à appeler de "communication". Car il s'agit bien toujours de communication, mais dans une acceptation bien moins réductrice que celle des théories exposées précédemment. Dans un système complexe où différents processeurs sont en communication, il n'est plus possible de distinguer ou de décider des émetteurs, des récepteurs, des canaux indépendants. Chacun échange, à la fois en tant que récepteur, transmetteur ou émetteur, des informations, des connaissances avec des signes et des conventions, parfois assez différentes d'un simple codage, qu'il soit informationnel ou sémantique. Il faut donc, pour rendre compte de ce nouvel aspect (l'axe du "contexte" dans notre triade)³⁷, décrire les circonstances, le système ("l'orchestre dans lequel la partition de la communication se joue" comme en parle Albert Schefflen, en opposant le modèle "orchestral" de la communication au modèle "télégraphique" ([Schefflen 73] cité dans ([Bateson 81], Part. 1, Chap. 1)) dans lequel les connaissances évoluent. Il n'est donc plus question de se référer à un modèle (génétique) de type *transmission* d'informations ou de connaissances, mais d'élaborer un modèle de *circulation* d'informations ou de connaissances.

Un tel modèle ne peut donc prendre place qu'en relation avec les principes de modélisation que nous fournit la systémique, c'est l'hypothèse fondamentale que posent par exemple les psychologues/anthropologues qui ont fondé ce qu'on appelle "l'école de Palo Alto", où la communication est vue comme un phénomène d'interaction et l'ensemble des messages échangés est vu comme un système. Ainsi, "dans des systèmes en interaction, la meilleure manière de décrire des objets n'est pas de les décrire comme des individus, mais comme des personnes-en-communication-avec-d'autres-personnes" ([Watzlawick 67] Chap. 4.2). De plus, cette manière de voir est fortement dépendante du modélisateur car "c'est à celui qui étudie le problème de décider quelles sont les relations importantes et insignifiantes" ([Hall 56] cité dans [Watzlawick 67]). Les caractéristiques principales d'un système sont *l'ouverture* (un système échange toujours des flux avec son milieu) *la totalité* (un système n'est pas réductible à la somme de ses éléments), *la rétroaction* (les composants d'un système ne sont pas en relation unilatérale ou causale, il y a la plupart du temps des boucles de rétroaction), *l'équifinalité* (dans un système circulaire, les évolutions ne sont pas tant déterminées par les conditions initiales que par la nature du processus lui-même où les paramètres du système) etc. Pour plus de détails on pourra consulter les ouvrages de référence

³⁷ "Nous voudrions montrer que l'étude de la communication humaine peut, comme celle de la sémiotique [...] se subdiviser selon les trois axes [...] : syntaxe, sémantique et pragmatique. Dans le cadre de la communication humaine, on pourrait dire alors que le premier de ces trois domaines recouvre les problèmes de transmission de l'information [...]. Ces problèmes sont d'abord des problèmes de syntaxe, et le théoricien de l'information ne se préoccupe pas du sens des symboles qui constituent le message. Le problème du sens est l'objet principal de la sémantique. Quoiqu'il soit parfaitement possible de transmettre des séquences de symboles avec une précision syntaxique parfaite, ces symboles demeureraient vides de sens si l'émetteur et le récepteur ne s'étaient mis d'accord auparavant sur leur signification. En ce sens, tout partage d'information présuppose une convention sémantique. Enfin, la communication affecte le comportement, et c'est là son aspect pragmatique. S'il est donc possible d'établir une séparation conceptuelle entre ces trois domaines, ils sont néanmoins interdépendants." ([Watzlawick 67] Chap. 1).

que sont [Le Moigne 77] et [Le Moigne 90]. On voit donc qu'on est bien loin d'un modèle de circulation d'information classique, et que dans des interactions complexes comme peut l'être la circulation de connaissances dans un système, il faut dépasser le modèle de l'émetteur, du récepteur et du canal bien déterminés.

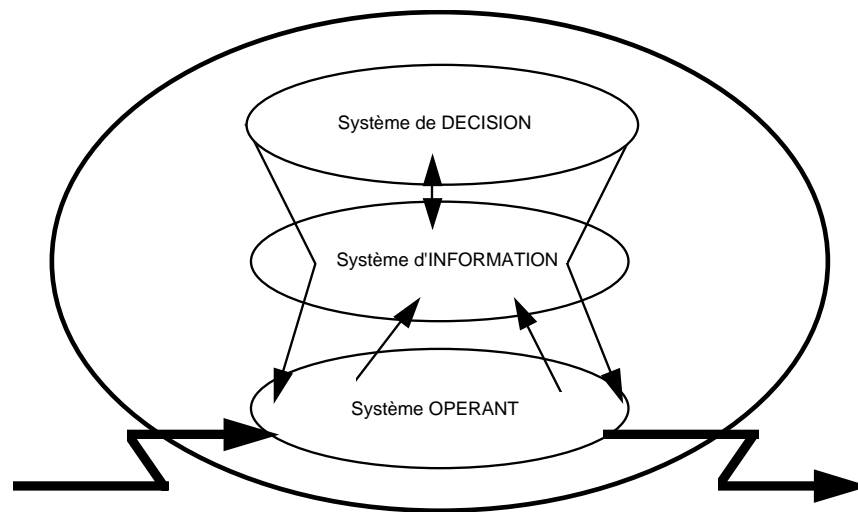


Figure 3.1. La vision classique d'un système organisé (modèle OID)

Pour essayer de comprendre comment circulent les connaissances dans un système, il est donc utile de faire appel aux modèles que nous fournit la systémique. Dans un système en général, on a coutume de distinguer le système opérant, le système d'information et le système de décision (figure 3.1). Le système d'information "enregistre les représentations - sous forme symbolique - des opérations du système opérant (le comportement du système complexe), les mémorise et les met à disposition, sous forme en général interactive, du système de décision" [Le Moigne 90] (il y a également une rétroaction du système de décision sur le système d'information). Cette modélisation est employée de manière très courante dans les entreprises, les organisations en général : le système opérant est constitué par les acteurs qui transforment des flux appelés intrants, d'énergie, de matière ou d'information, en d'autres flux de même nature, c'est le processus même de l'entreprise. Le système d'information, sacralisé ces dernières années, comme on a pu le voir au chapitre 1, est constitué par tout ce qui stocke, mémorise et met à disposition de l'information : documents, base de données, écrits, images etc. Ce système d'information informe les décisionnaires de l'organisation qui peuvent ainsi agir sur le processus de production, via le système opérant. Ce schéma se comprend également facilement par exemple pour un processus physique de production (une usine par exemple) : le système opérant est constitué des organes physiques des machines, le système d'information est constitué par les paramètres du système, acquises par des capteurs ou autres, et le système de décision par le superviseur qui conduit les machines (pouvant inclure les opérateurs).

Ce schéma permet de décrire un système quelconque. Si l'on reprend par exemple le système des feux de circulation, c'est un système dont la finalité est de modifier la conduite des véhicules à un carrefour (on peut en première approximation considérer qu'il s'agit d'une transformation de flux d'énergie - cinétique -). Le système opérant est constitué des véhicules sur lesquels agissent les conducteurs. Plus particulièrement, c'est la partie physique constituée des muscles moteurs des conducteurs qui agit sur les véhicules (on verra plus loin, pourquoi il convient de faire cette précision), c'est celle-ci qu'on place dans le système opérant. Le système d'information a été largement détaillé dans le chapitre 1, il s'agit des messages qui sont codés et transmis par les feux de circulation. Enfin, le système de décision est composé du système cognitif des conducteurs qui lit, interprète et décide pour modifier le comportement du système moteur de ces mêmes conducteurs, qui ensuite modifient la conduite des véhicules. On peut, éventuellement, y ajouter des agents de la circulation qui, au vu des signaux émis par les feux, peuvent considérablement influencer la décision et la conduite des chauffeurs ! (figure 3.2).

La première difficulté qui apparaît, avant même de se poser la question de savoir quelle forme prend la connaissance et comment elle circule dans le système, est de savoir où elle est localisée. Il ne s'agit plus, on a assez insisté là dessus, de la simple information transmise. Outre le caractère multidimensionnel, perçu de manière évidente, de cette connaissance (physique, cérébral, culturel, social...) on perçoit également un caractère certain d'ubiquité qu'on pourrait caractériser par l'aphorisme : "La connaissance est partout". Si l'on reprend par exemple la modélisation systémique ci dessus, on voit que la connaissance peut se trouver dans le système

décisionnel (connaissance du code de la route, des performances des véhicules, du contexte du carrefour, des conventions sociales...), dans le système d'information (toute la connaissance sur les codes des feux qui a été déjà si longuement abordée...), dans le système opérant (dans l'objet physique même du véhicule, où nombre de connaissances de conception peuvent être retrouvées qui sont utiles à la conduite aux carrefours...).

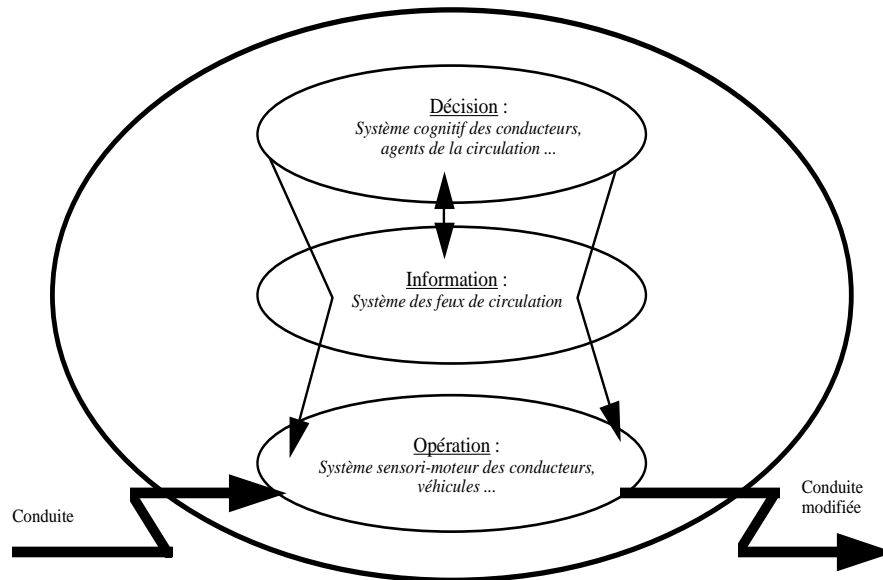


Figure 3.2. L'organisation d'un système de feux de circulation

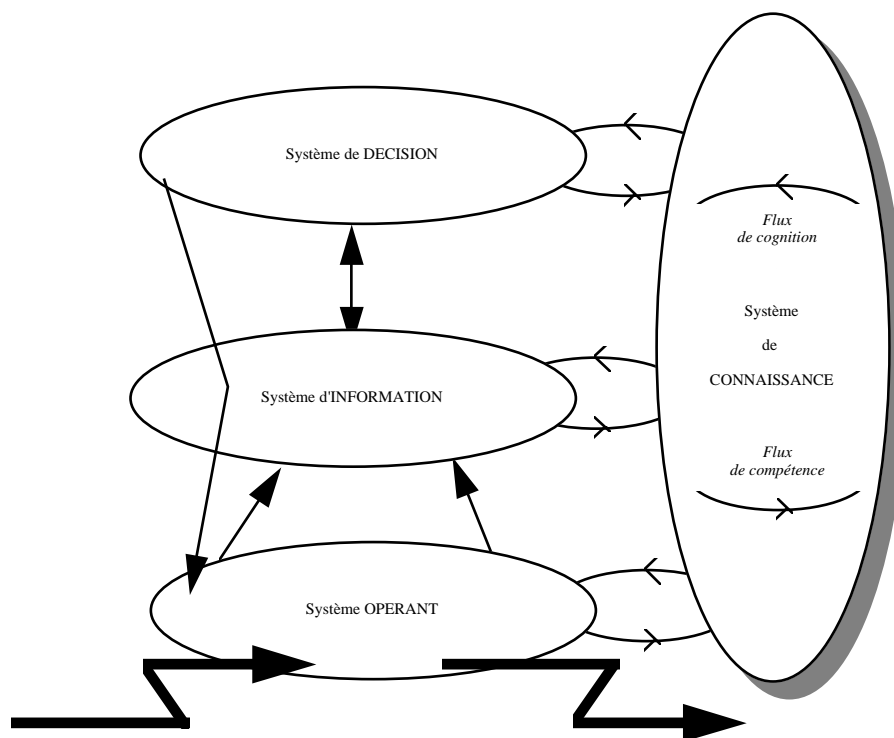


Figure 3.3. Le système de connaissances et les flux cognitifs

La connaissance n'est donc pas un attribut propre à un des sous systèmes, elle existe cependant en tant que telle, comme un patrimoine propre au système. Ceci justifie l'hypothèse de l'existence d'un quatrième système qu'on appellera "Système de (ou des) connaissance(s)" ou, pour reprendre l'expression d'Umberto Eco

"Patrimoine de connaissances" (cf. § 2.2.3). Ce sous-système est clairement un système actif. Il possède les deux activités fondamentales que lui prête Edgar Morin ([Morin 86], Introduction) : l'*activité d'acquisition* des connaissances produites, et l'*activité de cognition*, relative à la transmission de ces connaissances.

Le sous-système de connaissances est vu comme un sous-système actif du système. Ce processus se traduit classiquement par des flux qui créent des interrelations actives avec les autres sous-systèmes du système. Ces flux peuvent se classer en deux catégories : ceux qui partent des sous-systèmes vers le sous-système de connaissances correspondent, selon l'appellation d'Edgar Morin aux activités de *compétence* (production de connaissances), et ceux qui partent du système de connaissances vers les autres sous-systèmes correspondant aux activités de *cognition* (figure 3.3). On appellera ces flux de compétence ou de cognition aussi flux cognitifs. Le flux de compétence correspond à l'enrichissement (à travers le temps) du patrimoine de connaissances du système, par le biais de ses différents acteurs humains ou ses composants (objets physiques, systèmes d'information...). Le flux de cognition correspond à l'appropriation implicite (le plus souvent) ou explicite de ce patrimoine en vue de l'utiliser dans le processus de transformation propre au système.

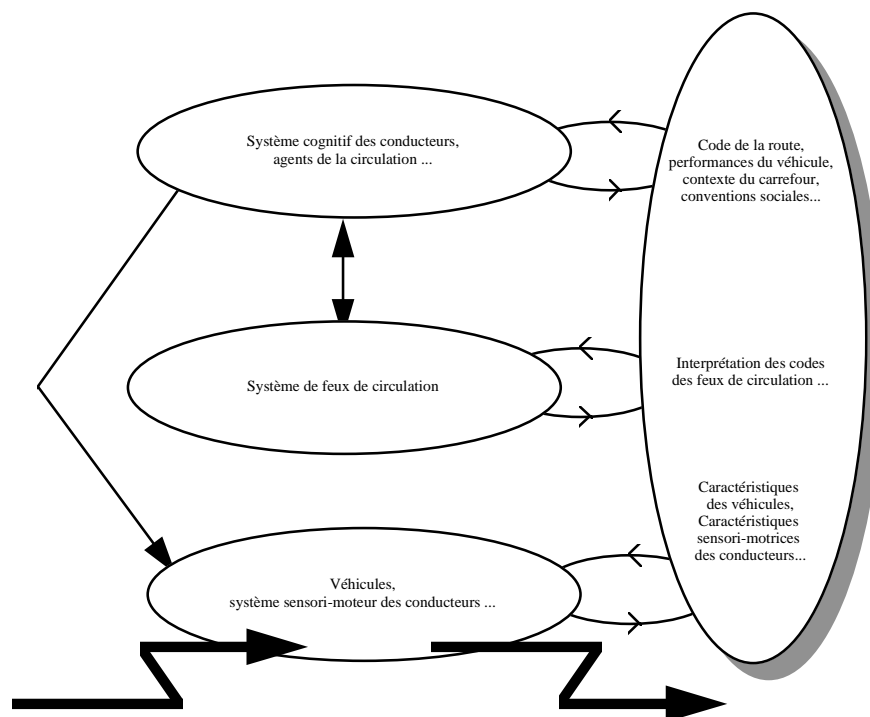


Figure 3.4. Cartographie des connaissances dans un système de feux de circulation

Les flux de compétence, représentent justement la compétence (au sens classique et intuitif) en termes de connaissance, des différents sous-systèmes du système, c'est-à-dire en quoi ils enrichissent le patrimoine de connaissances de ce dernier. Les flux de cognition, qui transitent du système de connaissances vers les autres sous-systèmes peuvent exister de manière diffuse, opérant par osmose, interpénétrant le système de connaissances et les autres sous-systèmes, selon l'hypothèse que cette pénétration est "profitable" (contribue au projet) globalement à tout le processus du système. Ils peuvent être créés volontairement (apprentissage, formation,...) dans des buts opérationnels précis, dans une optique d'appropriation des connaissances ou de circulation de ces connaissances. Les flux de cognition s'établissent souvent par un mécanisme transitif : un système enrichit le patrimoine de connaissances, et cet enrichissement transite ensuite par l'activité de cognition vers un autre système. Les flux de cognition du système de connaissances vers le système d'information sont d'une nature particulière. Ils sont du ressort même de notre problématique sur la connaissance puisqu'ils sont le fruit de l'activité qui consiste à identifier, caractériser et expliciter les connaissances, afin que le système d'information puisse les stocker et les mettre à disposition suivant sa mission première.

Le modèle de la figure 3.3 peut permettre d'identifier et caractériser les connaissances et les flux cognitifs d'un système, et réaliser ainsi une cartographie des connaissances qui peut déboucher sur des méthodes de gestion de ces connaissances [Brunet 94]. Par exemple, les connaissances présentes dans le système de la figure 3.2 sont représentées dans la figure 3.4.

3.3. Un modèle de processus cognitifs en contexte

3.3.1. Définition

On reprend ici l'étude qui a été faite dans [Brunet 94]. On appellera processus cognitif tout processus actif de l'organisation qui génère un flux cognitif, de compétence ou cognition ou leurs composés, tel qu'ils ont été définis ci-dessus. Comme de bien entendu, un processus cognitif est un processus complexe et ne se réduit pas à sa simple définition. On peut donc essayer d'appréhender un tel processus à travers un modèle qui rendrait compte de l'ensemble des points de vue possibles sur le processus, selon la méthodologie de base de la systémique. Ce modèle fournirait alors une grille d'analyse, support pour toute réflexion sur la mise en contexte des connaissances dans un système.

L'approche par flux qui a été choisie ici implique un certain nombre de choix de modélisation, qui découlent de la théorie du Système Général telle qu'elle est décrite dans [Le Moigne 77]. Le premier est la prise en compte de la dualité flux/champ : la notion de *flux* est indissociable de la notion complémentaire de *champ*. C'est un paradigme bien connu en physique, qui peut se généraliser aisément³⁸. Le flux est vu comme "un écoulement", et le champ comme "une capacité d'influence", le premier participe au processus actif, le second à l'environnement actif. Le second choix est la prise en compte d'une autre dualité, la dualité source/cible. En effet le flux est un "écoulement entre une *source* et un *puits*, entre deux *réservoirs* (le *tout s'écoule* héraclitéen)" ([Le Moigne 77] Chap. 4, §3)³⁹. Un flux relie donc deux systèmes, qu'on appellera *système source* et *système cible*, qui caractérisent le processus au même titre que le flux et le champ. La modélisation retenue ici, appelée modèle SCFC (pour Source-Cible-Flux-Champ), a été utilisée avec succès pour la première fois pour modéliser des processus de danger [MADS 92]. Ce modèle a été repris depuis dans d'autres applications car il caractérise bien la mise en contexte de connaissances (cf. infra). Il est utilisé ici dans la description même des systèmes de connaissances, ce qui constitue une première amorce d'un modèle réflexif (c'est-à-dire d'un modèle capable de se modéliser lui-même)!

3.3.2. Les systèmes source et cible

La première phase de l'analyse d'un processus cognitif consiste à identifier deux systèmes destinés à être liés par un flux cognitif.

Le premier est le système source, qui est donc à l'origine du flux en question. Ce système est un sous système (donc dans le modèle OID, il est inclus dans l'un des sous systèmes de décision, d'information ou opérant). Ce peut-être par exemple une personne, un groupe de personnes, un ensemble de documents, un système informatique, un process physique etc. Il identifie le support physique d'une connaissance, c'est à dire que c'est un système en tant que producteur d'une connaissance. En termes métaphoriques de topologie, et pour le situer par rapport au système de connaissances, on peut dire que c'est l'image réciproque homéomorphe d'un sous-système du système de connaissances par un flux de compétence. Le système source est le support d'un ou plusieurs processus actifs à l'origine du flux cognitif produit. Ce processus est appelé source cognitive (comme résumé de "source de flux cognitif"). C'est donc, en d'autres termes, une activité (cognitive) qui a pour lieu le système source (on pourra employer, pour plus de clarté, le terme d'activité source). Cette source est en général caractérisée par des attributs de base représentant le couple fondamental objets processus/objets processeurs qui définit la matière traitée et les acteurs qui la traitent.

³⁸ " Intervenant activement sur des flux qu'il contribue à traiter dans le temps, et activé plus ou moins intensément par des champs [...], l'artefact Système Général s'adaptera aisément à une représentation fidèle de tous les objets, de tous les phénomènes, que nous nous proposons de connaître, sur ou dans lesquels nous nous proposons d'agir. Il nous suggère une interprétation permanente des univers à décrire comme *tapisés d'objets appelés champs de force* et de phénomènes appelés flux d'objets en processus. Cette description *a priori* des environnements dans et sur lesquels intervient l'objet modélisé constituera en quelque sorte le sésame de toute systémographie. Quels flux, quels champs, donc quels environnements, dans quelle durée, sont concernés ?" ([Le Moigne 77] Chap. 4, § 3).

³⁹ "Pour qu'un système puisse être un processus... il est nécessaire qu'il soit en relation avec un système appelé réservoir ou source." [Boccaro 68] cité dans [Le Moigne 77].

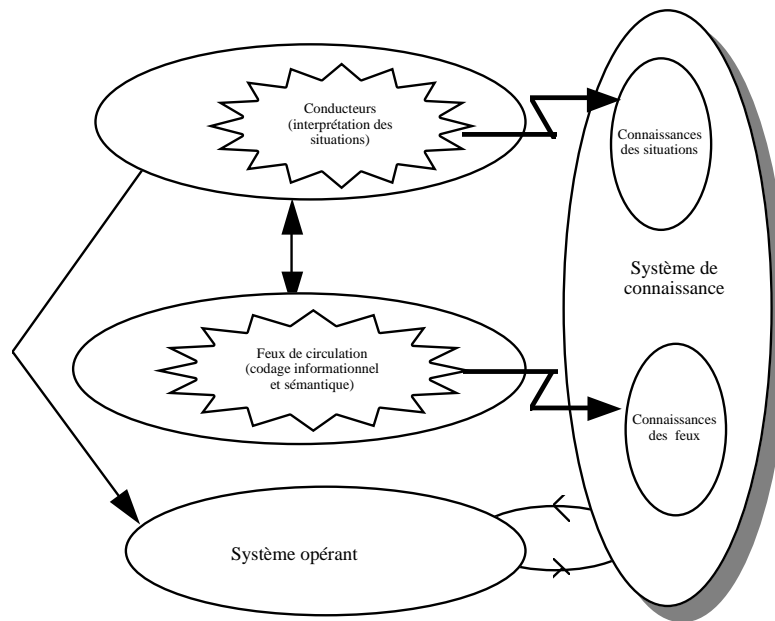


Figure 3.5. Exemples de systèmes sources

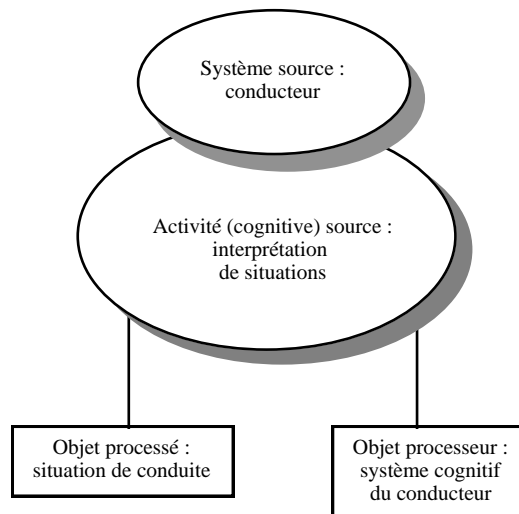


Figure 3.6.

Les caractéristiques d'un système source : objets traités et processeurs

Prenons l'exemple d'un système de feux de circulation tel qu'il est décrit dans la figure 3.4, on peut considérer qu'un feu est une source cognitive car il contient un grand nombre de connaissances, qui enrichissent le patrimoine du système. Tout ce qu'on a pu écrire sur ces feux jusqu'ici (codage informationnel, codage sémantique ...) n'a en fait qu'un seul but : matérialiser le flux de compétence qui fait d'un feu de circulation une source de connaissances. On peut également considérer, dans le système décisionnel de la figure 3.4, le ou les conducteurs (considérés en tant qu'agents cognitifs) comme source de flux cognitif, dans la mesure où leurs connaissances interprétatives des situations génèrent des flux de compétences qui alimentent considérablement le système de connaissances (figures 3.5 et 3.6).

On rajoute également au système source un événement externe dit initiateur, qui active le processus cognitif et est à l'origine (temporelle) du flux cognitif. Par exemple, l'événement initiateur de l'activité "interprétation de situations" est l'arrivée de la voiture au carrefour (figure 3.7), l'événement initiateur qui précède le codage des feux est beaucoup plus complexe à établir, on peut dire en première approche qu'il s'agit du désir d'inventer un code compréhensible par tous pour réguler le trafic aux intersections routières. Quant à l'historique exact des feux de circulation, il s'est perdu dans l'histoire des cultures des sociétés, et il doit y avoir bien peu de gens capables de donner les raisons qui ont fait que ces feux sont ce qu'ils sont aujourd'hui (nous ne sommes pas du nombre de ces personnes !).

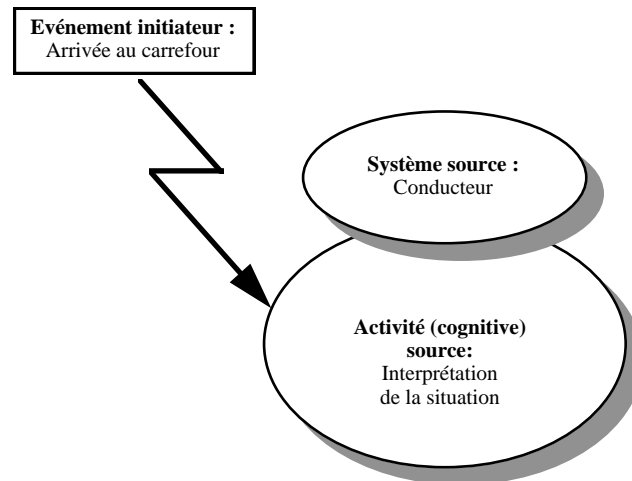


Figure 3.7. L'événement initiateur sur le système source

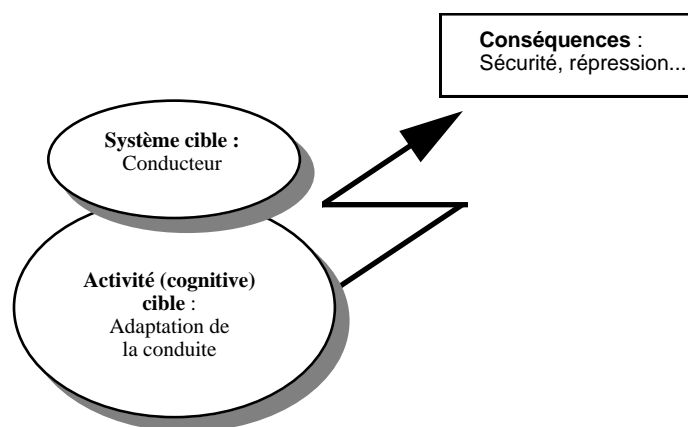


Figure 3.8. Le conducteur considéré comme système cible

Le second système, dual du premier, est le système cible. C'est encore un sous-système du système global (inclus dans le sous-système de décision, d'information ou opérant). Il identifie le support physique qui reçoit le flux cognitif, c'est un système qui reflète une connaissance. On peut comme auparavant dire que c'est l'image homéomorphe d'un sous-système du système de connaissances par un flux de cognition. Là encore, on peut distinguer les processus actifs liés au système cible, qu'on appellera activités cibles : ce sont les tâches (cognitives) effets des flux engendrés par les activités sources. Comme auparavant, il est possible de caractériser ces tâches effets par les attributs de base que sont les objets processés et les objets processeurs. Par exemple, on peut considérer que le système formé par le conducteur (en tant qu'agent cognitif) est un système cible, puisqu'il reçoit des informations (des connaissances) qui lui sont destinées. Mais on peut également considérer que les feux eux-mêmes sont des systèmes cibles, dans la mesure où ce sont les conducteurs qui sont actifs en tant qu'agents cognitifs et qui "investissent" les feux d'une signification qui leur est propre, en fonction de leur patrimoine et de l'analyse de la situation. Dans le premier cas, l'activité cible est la régulation de la conduite de son véhicule par le conducteur (celui-ci est l'objet processeur, celle-là l'objet processé)(figure 3.8), dans le

second cas l'activité cible est la transmission de l'information par le feu de circulation (c'est la seule chose que lui demande l'automobiliste !), avec comme objet processeur le feu lui-même (l'émetteur) et comme objet processé l'information (le message).

Dans le modèle du système cible, d'une manière équivalente au modèle du système source, on peut également rajouter des événements externes qui sont des conséquences externes de l'impact du flux cognitif sur la cible. Il est à noter que les objets "événements initiateurs" et "conséquences" sont essentiels dans une telle modélisation. Il n'existe en effet pas de système "isolé", et chaque système est en relation avec d'autres systèmes, les objets cités sont donc les intrants et les extrants qui mettent le système modélisé en relation avec l'environnement extérieur. Cet environnement n'est pas actif pour le processus (c'est le champ qui représente l'environnement actif), mais il peut à la suite devenir le support d'autres processus susceptibles d'une modélisation similaire, créant ainsi une chaîne de processus interreliés, phénomène de "réaction en chaîne" bien connu dans de nombreux domaines.

3.3.3. Le flux et le champ

Une fois définies la source et la cible avec leurs caractéristiques, il reste à les relier par un flux. Ce flux cognitif relie donc un sous-système du système (d'information, de décision, ou opérant) à un autre tel sous-système (qui peut d'ailleurs être le même). Bien que n'ayant pas son origine ou son extrémité dans le système de connaissances, ce flux est appelé cognitif au sens décrit par la figure 3.3, car on fait l'hypothèse qu'il "transite" par le même sous-système du système de connaissances. C'est donc une composition licite au sens mathématique d'un flux de compétence puis de cognition, ou vice versa. Ainsi le flux reliant le système source "feux de circulation" au système cible "conducteur" est le composé du flux de compétence qui inscrit la signification des messages des feux en question dans le patrimoine de connaissances et le flux de cognition qui est l'appropriation (partielle en générale) de la connaissance des feux par un conducteur (figure 3.9). En fait, il ne s'agit pas, en général, exactement de cette composition (il est bien difficile par exemple, d'explicitier le flux de compétence des feux de circulation !), mais d'un flux qui "ressemble" ou qui "suit" cette composition. En termes de topologie, on peut dire que ce flux est isotope à la composition d'un flux de compétence et de cognition (i.e. une déformation continue, un flux équivalent).

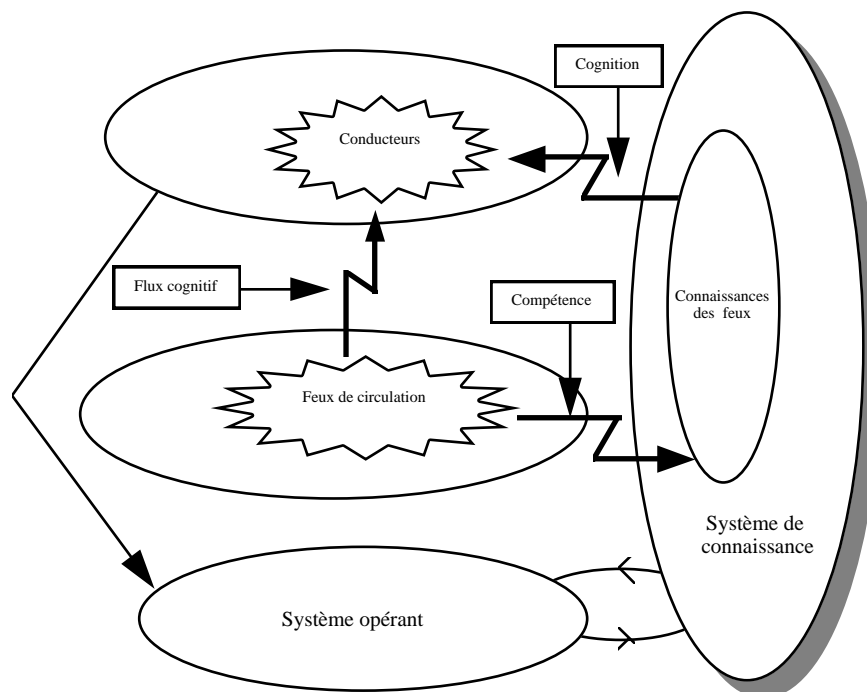


Figure 3.9. Exemple de flux cognitif

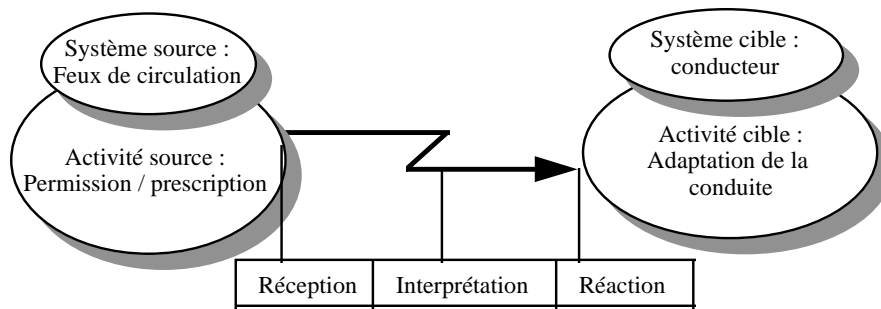


Figure 3.10. Exemple de caractérisation (dans le temps) d'un flux cognitif

De nombreuses caractérisations du flux peuvent être données. On peut par exemple donner ses stades d'évolution dans le temps, la forme ou l'espace. Dans un processus cognitif, ces aspects sont articulés et fournissent différents points de vue sur le processus que l'on peut représenter dans le modèle. Ainsi, si l'on regarde le flux échangé entre les feux de circulation et les conducteurs, en vue de réguler leur conduite, on peut distinguer plusieurs phases (cycle de vie du flux) qu'on pourrait en première approche nommer : réception (du message), interprétation et réaction (figure 3.10).

Comme nous l'avons déjà signalé, l'existence d'un flux s'accompagne duale de l'existence d'un champ qui représente l'*environnement actif* du processus (différent de l'environnement au sens habituel, qui lui est le plus souvent connecté "faiblement" - par intrants et extrants - au processus). La représentation source, flux, cible est immergée dans un champ actif qui regroupe l'ensemble des processus provenant de l'environnement du processus cognitif qui peuvent influencer l'état des systèmes sources et cibles, donc des processus qui peuvent s'y dérouler et l'état ou l'évolution du flux. Ce peut être des éléments du contexte extérieur, les objectifs du processus modélisé etc. Nous terminerons cette description en notant qu'un processus cognitif peut être complexe et qu'il peut éventuellement se décomposer en processus intermédiaires (le système cible devenant à son tour un nouveau système source et ainsi de suite). Ces processus intermédiaires peuvent ainsi s'enchevêtrer et former un réseau en interrelations complexes, constituant un objet cognitif structuré selon les principes de la théorie du Système Général⁴⁰.

3.3.4. Conclusion

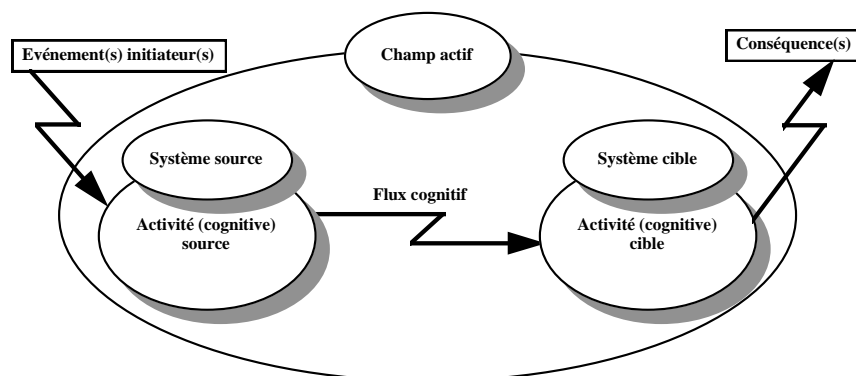


Figure 3.11. Le modèle complet d'un processus cognitif

La figure 3.11 résume le schéma de circulation de connaissances suivant l'approche par les flux cognitifs. Il appartient au modélisateur d'identifier, suivant son projet, les différents éléments de ce modèle qui lui permettront de mettre la connaissance qu'il veut traiter dans le contexte qui l'intéresse. Le modèle ainsi donné ne préjuge pas de ses instanciations possibles. Elles sont innombrables, il est vain et inutile de vouloir les recenser

⁴⁰ " On appelle précisément Système Général le réseau [...], ainsi identifié dans un ensemble de processus, restant en interrelation (on dira ouvert ou quasi-isolé) avec le reste des processus considérés (que l'on désignera habituellement : Environnement du Système Général)" [Le Moigne 77, Chap. 5, § 3).

toutes. Avant toute étude sur la signification ou l'information fournie par la connaissance en jeu, il est indispensable d'effectuer une telle mise en contexte.

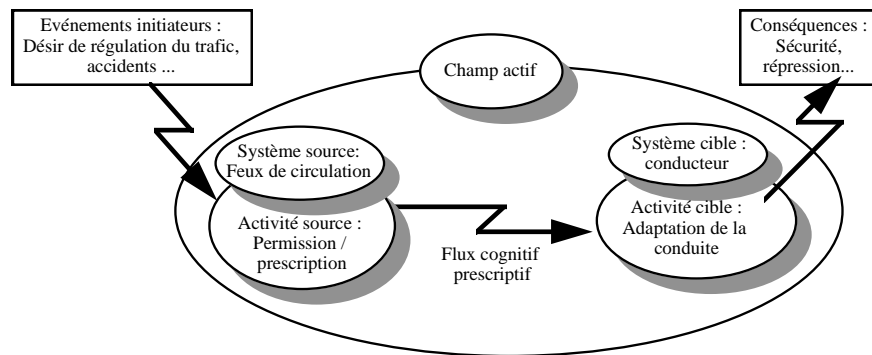


Figure 3.12. Contexte légal d'étude des feux de circulation

Reprenons les exemples qui ont été cités ci-dessus. Dans un contexte d'étude des feux de circulation qu'on qualifiera de "légal", le feu en lui-même est considéré comme système source. Il génère un flux de type prescriptif vers le système cible qu'est le conducteur (figure 3.12). Avec ce point de vue (i.e. dans ce contexte), l'analyste poursuivra par une étude qui ne pourra déboucher que sur un système de type legaliste comme l'écriture des règles du code de la route. Dans un contexte qu'on qualifiera de "social", on considère que c'est le conducteur qui est le système source, en tant qu'il interprète les signaux qu'il reçoit des feux afin d'adapter sa conduite. Ceci peut se caractériser par un flux de type interprétatif orienté vers le feu, considéré comme le système cible du processus (figure 3.13). Une étude avec ce point de vue pourra déboucher par exemple sur un système d'aide à l'interprétation des feux ou d'aide à la conduite pour le véhicule ou son conducteur.

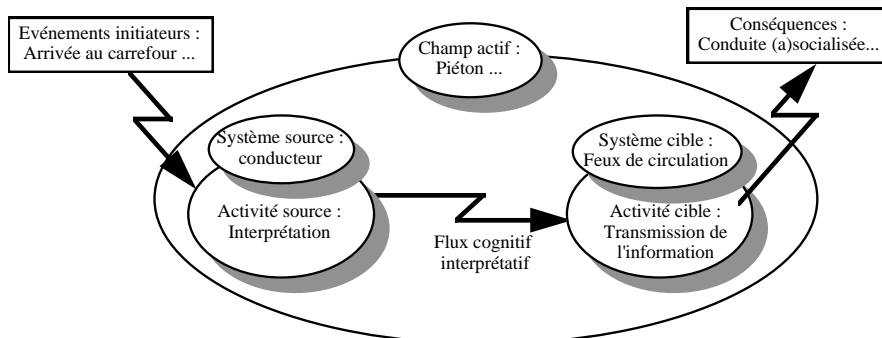


Figure 3.13. Contexte social d'étude des feux de circulation

3.4. Les connaissances en contexte : Systèmes des connaissances, connaissances des systèmes

Nous venons de faire une longue mais nécessaire digression sur un aspect "génétique" du point de vue contextuel dans un système de connaissances. Le point de vue informationnel est attaché au processus d'information (modèle de Shannon) qui guide fortement la définition ontologique de la connaissance/information, le point de vue sémantique est attaché au processus sémiotique qui guide également la définition ontologique de la connaissance/signification. Il semblait donc nécessaire de fixer un processus, appelé ici "cognitif (en contexte)", pour établir une définition ontologique de la connaissance/contexte. Comme on a pu le voir, il n'y a pas vraiment un processus mais une infinité de processus possibles dans un système de connaissances donné. Ceci correspond bien à l'idée qu'on se fait d'un phénomène de circulation de connaissances dans un système complexe (un phénomène de communication). Pour faire le lien avec le modèle de Shannon, on constate qu'il y a une multitude de canaux possibles de transmission (les flux), il y a une multitude de sous-systèmes qui sont à la fois récepteurs et émetteurs (sources et cibles), l'environnement intervient non pas comme une source de bruit mais comme un élément actif du processus (champ), les canaux, les émetteurs, les récepteurs ne sont pas indépendants et ne peuvent être isolés les uns des autres, ils ne peuvent être vus que comme participant à un processus commun (processus cognitif - en contexte -). Pour maîtriser cette complexité

apparente de la connaissance en contexte, en dehors des études spécialisées sur ce domaine⁴¹, on a décrit ici un cadre général, fondé sur des principes systémiques, qui permet au modélisateur de définir et préciser le contexte de son projet d'études sur un système de connaissances particulier. Il est clair que toute l'étude sera dépendante de ces choix fondamentaux de modélisation.

Le modèle de processus cognitif décrit ci-dessus est donc bien un modèle de mise en contexte pour un système de connaissances. Il permet de préciser le mode de circulation des connaissances qui est en jeu, et par là, il recoupe une notion couramment admise de contexte. Cela ne recouvre pas cependant une ontologie du contexte au sens où elle a été abordée par exemple pour l'information et la signification. Il s'agissait là de définir les éléments d'un langage descriptif des éléments informatifs ou sémantiques des objets d'un domaine donné. Le modèle SCFC qui a été élaboré ici a permis de décrire des éléments du contexte, non pas du domaine de connaissances lui-même, mais du système de connaissances sur le domaine, ce qui n'est pas tout à fait la même chose : on ne parle pas des connaissances du domaine, mais des flux de connaissances dans le système des connaissances du domaine !

Pour en revenir au domaine lui-même, nous allons simplifier exagérément notre propos, d'abord dans l'approche du terme "contexte", puisque la problématique que posée ici est de définir une ontologie de la composante contexte d'une connaissance donnée. Le problème qui transparaît dans une analyse de connaissances basée sur le triangle sémiotique syntaxe/sémantique/pragmatique, que nous avons finalisé en l'autre triangle information/signification/contexte, est celui, fondamental, de *granularité*. Dans chaque composante, la connaissance est examinée avec une granularité distincte, ce qui nous ramène à la métaphore du microscope de Claude Lévi-Strauss, citée dans le chapitre précédent⁴² (figure 3.14) : on peut choisir son niveau de grossissement, on y découvre une organisation, une "vérité" toute relative, qui ignore celle des autres niveaux. L'information contenue dans une connaissance est la granularité minimum qu'on peut obtenir (mesurée par le bit informationnel), la signification a une granularité plus importante, celle donnée par les composants sémantiques (les sèmes), qui réfèrent à une dimension plus grande du "réel". La composante contextuelle a pour vocation de donner une vision à granularité supérieure de la même connaissance. La définition qu'on aura du contexte dépendra donc de la définition qu'on donnera de cette granularité.

Il y a une manière simple et maintenant courante de définir ce niveau de granularité, il nous est donné par opposition aux concepts de la modélisation analytique. La démarche jusqu'ici adoptée, tant du point de vue de l'information que de la signification est une démarche de type analytique : décomposer pour expliquer, disjoindre des éléments, découvrir des structures neutres. Ce type de démarche, bien connue et scientifiquement éprouvée montre ses propres limites dans notre domaine même (qu'on songe à ce constat presque d'échec de la non-exhaustivité du code, ou le rejet du non-compréhensible dans une hypothétique pragmatique). Depuis un certain temps sa remise en question a déjà engendré une nouvelle épistémologie qui est celle de la systémique. A la méthode d'investigation analytique, on substitue la méthode systémique qui ne *découpe* pas mais *articule* les systèmes, qui n'y cherche pas les *structures* mais les *organisations*, qui n'y cherche pas des *évidences* capables d'*expliquer*, mais des *pertinences* qui permettent de *comprendre* [Le Moigne 90]. On peut en fait envisager la question du contexte sous cet angle : l'aspect contextuel d'un système de connaissances permet d'avoir une *vision globale* (systémique et non analytique), qui dégage des *points de vue pertinents* permettant la *compréhension du système* étudié.

Le point de vue systémique du contexte posé, il est alors possible de revenir sur les commentaires du début de ce paragraphe. La connaissance du domaine, dans son aspect contextuel, est donc la connaissance du domaine vu en tant que système, c'est donc la connaissance du système. Le système de connaissances est donc le système des connaissances du système (et l'on pourrait ainsi poursuivre la récursivité !). On entre alors dans la boucle modélisatrice représentée dans la figure 3.14.

⁴¹ On peut citer par exemple les études de pragmatique en linguistique et en communication ([Bougnoux 93], chapitre 3, dont on pourra lire le très intéressant avant-propos), l'étude des connaissances dans leur contexte en intelligence artificielle ([IJCAI 93]), ou l'étude des connaissances dans leur contexte sociologique ([Cazeneuve 76]).

⁴² "comme cela se produit avec le microscope optique, incapable de révéler à l'observateur la structure ultime de la matière, on a seulement le choix entre plusieurs grossissements : chacun rend manifeste un niveau d'organisation dont la vérité n'est que relative, et exclut tant qu'on l'adopte la perception des autres niveaux" ([Lévi-Strauss] 64, Ouverture I).

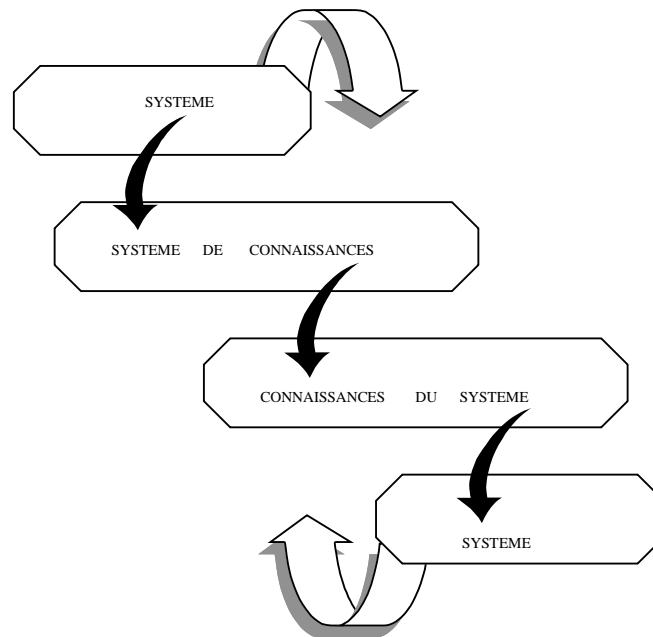


Figure 3.14. La boucle modélisatrice qui représente le cycle Systèmes des connaissances/Connaissances des systèmes

Dans une vision contextuelle, un système est caractérisé par les connaissances qu'on a du système (quand on modélise un système, on ne modélise que les - ou des - connaissances que l'on a sur ce système), ces connaissances forment un système (c'est ce qu'on a montré ci-dessus) qui caractérisent de nouveau le système. C'est le cycle qu'on peut désigner d'une manière imagée par un chiasme (figure de rhétorique chère à Edgar Morin et Jean-Louis Le Moigne !) : Systèmes des connaissances/Connaissance des systèmes. Et pour reprendre ce qu'on dit en théorie de l'information, à savoir que nous ne percevons le monde réel qu'à travers des messages, on peut ajouter nous ne comprenons des systèmes qu'à travers des connaissances, qui s'organisent en système.

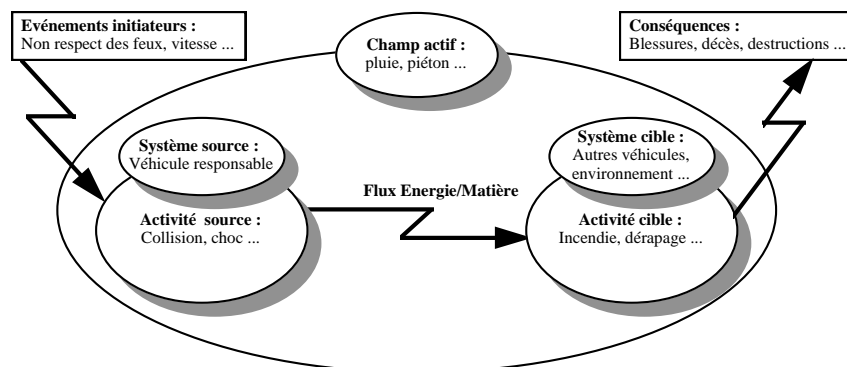


Figure 3.15. Modèle SCFC pour la mise en contexte des connaissances dans le domaine des accidents de la circulation aux intersections

Le fait de considérer la mise en contexte de connaissances comme la description d'un système autant que la description des connaissances que l'on a sur ce système permet d'utiliser les mêmes outils de modélisation de système. Ces derniers sont très nombreux et variés (cf. par exemple [Walliser 77]), et aucun ne peut prétendre à l'universalité. On ne fera donc pas de choix parmi ceux-ci, (ce qui d'ailleurs serait bien difficile, car il faudrait les connaître ou les pratiquer tous !). Cependant, le cycle de modélisation décrit dans la figure 3.14, nous autorise à penser qu'un modèle décrivant un système de connaissances, dans son aspect contextuel tel que nous l'avons décrit (modèle SCFC) est également apte à décrire un système, en tant que description de la mise en contexte d'un domaine de connaissance. C'est un fait que les concepts duaux source/cible, flux/champ relèvent de la théorie du Système Général et n'ont été utilisés ici que d'une manière très particulière (flux cognitifs). Il est donc

possible d'utiliser un modèle SCFC pour représenter un système dans l'optique de "mettre en contexte" les connaissances qu'on possède dessus, c'est-à-dire de dégager une vision globale susceptible de dégager l'ensemble des points de vue pertinents dans le projet qui est en jeu.

Un modèle SCFC se compose donc d'un sous-système source, support physique d'un flux et d'une activité source (activité au sens large) qui génère ce flux, qu'on peut appeler, s'il n'y a pas de confusion source (on confond souvent système source et source). Pour chaque domaine de connaissance, on peut d'ailleurs dresser une taxinomie des systèmes sources et des sources (cf. par exemple [MADS 92]). On définit dualement un sous-système cible et une activité cible (qu'on appelle parfois effet). Le système décrit étant nécessairement en interrelation avec d'autres systèmes, où l'environnement en général, il est nécessaire de modéliser des flux intrants, qui parviennent au système source et représentent l'initialisation de l'activité source (on parle de flux ou d'événement initiateur), et des flux extrants, qui partent du système cible et représentent les conséquences de l'activité cible. Par ailleurs, le système source et le système cible sont reliés par un flux de nature diverse⁴³. L'ensemble subit l'influence directe d'un champ, qui peut agir autant sur le flux que sur les systèmes source ou cible.

Bien sûr, la description faite ici est très sommaire. Elle peut s'affiner et s'adapter au fur et à mesure des applications. Mais elle fournit déjà un cadre pour la mise en contexte de connaissances, et procure un premier langage de description générale d'un contexte, ébauche de l'ontologie visée dans ce chapitre.

A titre d'exemple, la figure 3.15 est une illustration d'un tel modèle dans le domaine des accidents de la circulation aux intersections régularisées par des feux.

3.5. Le contexte : mythes et limites

3.5.1. La discontinuité analytique/systémique

Par rapport aux approches qui ont été faites dans les chapitres précédents, l'abord du contexte tel qu'il est présenté ici présente une certaine rupture. Les modèles de l'information ou de la signification sont de type analytique. Ce sont des décompositions qui cherchent à isoler des phénomènes, informatifs ou sémantiques, et qui permettent d'expliquer des comportements particuliers de systèmes de connaissances. Ils tendent donc à rejeter d'autres points de vue que le leur, car ils ne rentrent nécessairement pas dans leur cadre de modélisation. Les modèles du contexte sont, ou du moins cherchent à être, radicalement différents. Ce sont des modèles systémiques, dont le but n'est pas d'isoler un aspect particulier, mais de permettre d'intégrer un ensemble de points de vue sur un domaine. Ils permettent d'exprimer, voire de maîtriser, la complexité d'un système (ou de manière équivalente, comme on l'a vu, des connaissances qu'on a sur un système). Il existe donc un saut qualitatif important, qui correspond au saut méthodologique analytique/systémique (cf. [Le Moigne 90]). Ceci n'est pas sans poser de problème.

Le premier problème est celui de la *généralité*. Un modèle systémique, par ses visées même, est nécessairement général, comme nous l'avons vu, il se situe à un niveau de granularité maximum dans la connaissance. Il faut donc fixer ce niveau de granularité, et il ne semble pas y avoir de critères pour effectuer un tel choix, si ce n'est la perception propre des modélisateurs. On pourrait même envisager plusieurs niveaux, plusieurs granularités de modélisation du contexte. Par ailleurs, le niveau requis de généralité dans un modèle de contexte est souvent inversement proportionnel à son "utilité" (i.e. son caractère opérationnel dans une action de gestion d'un système connaissances). Dans une perspective opérationnelle, établir un modèle de contexte peut n'apparaître que comme un jeu intellectuel qui ne sert pas vraiment, en fait parce qu'il n'explique rien dans le système, qu'il ne fait que mettre en contexte des connaissances. On peut donc parfois douter de l'opportunité (voire de la valeur) de l'effort consenti à concevoir des modèles systémiques, pour ensuite devoir dépenser autant ou plus d'énergie pour concevoir des modèles analytiques d'une toute autre nature. C'est un dilemme bien connu des ingénieurs de toutes sortes, qui cherchent souvent à parer au plus pressé ou à obtenir rapidement des résultats opérationnels, au mépris des questions d'ordre général. Cependant, dans bon nombre de projets ou systèmes complexes, l'expérience a maintes fois prouvé qu'il est utile de remettre "les choses dans leur contexte" pour obtenir des réalisations pertinentes et répondant réellement aux problèmes existants.

⁴³ Classiquement, on classe les flux en trois catégories principales : matière, énergie, information, mais il est tout à fait possible d'établir d'autres natures de flux (comme nous l'avons fait pour les flux cognitifs) et des taxinomies plus fines (cf. [Le Moigne 77] Chap. 3 et Annexe 1)

Le second problème est celui de la *validité*. Le but de la modélisation du contexte, à savoir donner une vision d'ensemble sur les points de vue possibles d'un système de connaissances, est suffisamment ambitieux pour qu'on mette en doute la pertinence de tout modèle construit ayant cette prétention. Il s'agit là d'une sorte de cercle vicieux, car il ne peut pas y avoir de validation à proprement parler. La validation est un concept analytique, elle cherche à prouver la *cohérence* d'un modèle par rapport à une norme qui lui est extérieure. Dans un modèle systémique, on ne se pose pas le problème de la cohérence, mais de la *cohésion* du modèle, à savoir une certaine pertinence interne, qui ne peut pas être prouvée au sens classique, mais qui peut être perçue. La validité d'un modèle de contexte, en quelque sorte, ne peut être que celle que lui donne le modélisateur ou l'ensemble des acteurs du projet en tant qu'*outil de communication de connaissances*. Un modèle de contexte ne trouve sa justification que dans la mesure où il est un bon instrument pour rendre intelligible à un certain nombre de personnes un système de connaissances donné.

3.5.2. La téléologie des modèles de contexte

Un des principes fondamentaux de la modélisation systémique est ce qu'on appelle l'hypothèse téléologique : toute modélisation suppose "au moins un projet identifiable par rapport auquel son comportement pourra être interprété" ([Le Moigne 77] Chap. 2, § 2). Ainsi, toute représentation de système est nécessairement finalisée, ce qui "permet à la modélisation de franchir une étape que lui interdisait l'interprétation déterministe (causaliste donc)" ([Le Moigne 77] Chap. 6, § 2)⁴⁴. Ceci signifie bien que les modèles élaborés ne cherchent pas à donner des explications causales des phénomènes, comme les modèles structuraux (ou structuralistes), mais traduisent une ou plusieurs finalités du système identifiées par le modélisateur. De là apparaît une nouvelle conséquence de la rupture signalée au paragraphe précédent : un système (de connaissances) n'est modélisable qu'à travers ses finalités et non pas d'une manière neutre. Un modèle de mise en contexte n'est donc pas innocent, il reflète le choix du ou des projets qu'on a identifiés, si bien que les modèles mis en place peuvent très bien être mis en cause pour leur partialité, leur caractère partiel ou leur manque de "rigueur" au sens cartésien du terme. Comme on l'a déjà dit ci-dessus, seule la pertinence en tant qu'outil de communication est acceptable dans cette démarche. Il semble d'ailleurs, a posteriori, que ce soit pur bon sens que d'affirmer qu'une mise en contexte de connaissances n'est qu'une opération orientée par la volonté des modélisateurs - reflet du ou des projets du système de connaissances en question - !

⁴⁴ "L'organisme [le système] ne se contente pas d'obéir à d'éventuelles lois causales, il les utilise, comme le ferait un bon ingénieur, pour accomplir le projet, le "rêve" de l'organisme [du système]" [Monod 70] cité dans ([Le Moigne 77] Chap. 2, § 2).

Chapitre 4

Connaissance et information

Aspects fonctionnels

4.1. Introduction

La théorie de Shannon donne une définition précise de l'information contenue dans un système, ou plutôt transmise par un système. C'est donc une définition de la nature, de l'ontologie de l'information, reconnue comme un invariant structurel d'un système. Le point de vue fonctionnel ou phénoménologique pose le problème de la définition de l'information d'une manière distincte, mais duale. "L'invariance, indispensable à la science, qui ne peut plus être ontologique, se réfugie dans la relation [...] il existe, exprimable mathématiquement, une relation invariante unissant des phénomènes variant corrélativement l'un par rapport à l'autre" ([Virieux-Reymond 72] chap. II §4). L'information peut donc être définie comme résultat d'une fonction appliquée à l'objet (le système) informationnel. Cette fonction peut être une fonction cognitive (le traitement informationnel des neurones), une fonction expérimentale (la perception de l'information), ou une fonction formelle (une théorie de l'information), mais, dans tous les cas, elle est caractéristique de la production/perception de l'information plus que de la description de cette dernière. " A cette description formelle (la forme décrite du point de vue de ce qu'elle est), il importe d'ajouter [...] le point de vue de ce qu'elle fait lorsqu'elle est mise au contact de son environnement " ([Le Moigne 77] Chap. 2 § 3). C'est donc ici l'aspect phénoménologique de l'information qui nous intéresse en tant que composante de la connaissance⁴⁵. On verra que cet aspect, comme on peut s'y attendre en face de théories duales, est en correspondance parfaitement bijective avec l'aspect développé par Shannon (ceci fait même l'objet d'un théorème mathématique).

Plutôt que de fonction qui caractérise l'information, on parle de *programme*, qui lit ou produit le contenu informationnel d'un système. Le programme est l'objet d'étude fondamental de l'informatique, qui se définit comme la discipline du traitement de l'information. L'aspect fonctionnel de la composante informationnelle de la connaissance correspond donc au traitement de l'information, alors que l'aspect ontologique qu'on a vu au chapitre 1 correspond à la nature de l'information. On verra en détail ci dessous à quel point ces deux aspects sont équivalents.

L'étude de l'information en tant que produite par un programme s'appelle *la théorie algorithmique de l'information*. Elle a été initialisée parallèlement par le mathématicien russe A.N. Kolmogorov en 1965 et l'américain G.J. Chaitin en 1966 (cf. [Chaitin 1987]). L'idée de départ est de définir la mesure de l'information contenue dans (ou transmise par) un système comme la taille du plus petit programme capable de le définir. Pour donner un exemple simple, une suite infinie de chiffres 1 contient très peu d'information, puisqu'on peut la définir en très peu de mots (c'est ce que nous venons de faire), alors que définir la suite des résultats successifs d'un tirage (infini) à pile ou face demande une quantité infinie d'information (une information par tirage). Cette définition a été reprise pour définir la *complexité d'un système*. Elle permet de faire le lien avec d'autres paradigmes de la complexité dans des disciplines comme la physique ou la chimie ([Nicolis 89]). Cette théorie de la complexité algorithmique n'est donc autre qu'une théorie "syntaxique" en ce sens où c'est une théorie de l'information et que l'information n'est qu'une des trois composantes fondamentales (syntaxique, sémantique et pragmatique) de la connaissance. Ce n'est de plus que du point de vue fonctionnel (ou phénoménologique) qu'elle rend compte. Sa richesse formelle et ses applications en informatique théorique en font cependant un objet d'étude fascinant et extrêmement développé.

⁴⁵ "Voyons d'abord ce qu'est la connaissance, puisque c'est ce qu'il s'agit de théoriser, ou de simuler. Et voyons la en phénoménologie : en décrivant l'expérience qu'elle est pour chacun de nous, non sans doute de manière entièrement naïve, mais en nous servant, puisqu'il s'agit de théorie de la connaissance, de ce que la philosophie a déjà dit, et, puisqu'il s'agit de science, de ce que la neurophysiologie, la psychologie, la linguistique, les théories de l'information et des régulations ont déjà établi." [Pichot 91].

4.2. Le concept de programme

4.2.1. La machine de Turing

Pour définir les bases de la théorie algorithmique de l'information, il faut bien sûr définir la notion de programme et de son exécution. Intuitivement, un programme peut être représenté "par un ensemble de règles qui permettent de réaliser mécaniquement toute opération particulière correspondant à un certain type d'opération. On peut encore dire que c'est une procédure mécanique qui appliquée à une certaine classe de symboles (symboles d'entrée), fournit, éventuellement un symbole de sortie [...], un certain nombre de caractéristiques apparaissent essentielles :

- Un programme est un ensemble d'instructions de taille finie (taille mesurée en nombre de symboles nécessaires à l'énoncé des règles, par exemple)
- Un opérateur (humain, mécanique, optique etc. ou électronique) réagit aux instructions et effectue le calcul
- Des dispositifs (papier et crayon, roues dentées, mémoires magnétiques etc.) permettent d'effectuer, de stocker et de retrouver les différentes étapes du calcul
- Les processus sont essentiellement discrets
- La suite des opérations élémentaires à effectuer est parfaitement déterminée (elle sera dite déterministique): à chaque étape, il n'y a qu'une possibilité de passer à l'étape suivante.

L'analogie avec l'ordinateur est claire :

- correspond au programme
- correspond au calculateur électronique où passe le programme
- correspond à la mémoire de l'ordinateur
- correspond à la nature numérique ("digitale") et non point analogique de l'ordinateur
- correspond à la nature mécanique et déterminée du passage du programme" ([Gross 67])

Pour formaliser ces idées intuitives simples, afin de faire des études précises et établir des résultats non ambigus (à défaut d'être clairs car compréhensibles seulement par ceux qui manient le formalisme), il a fallu se doter d'un formalisme de base, une représentation rigoureuse et détaillée de ce que peut être un programme et son exécution. L'idée est de définir une sorte de machine à calculer idéale qui permette de définir et réaliser les conditions énumérées ci-dessus. C'est le mathématicien et logicien A.M. Turing qui dès 1936 a donné une définition scientifique de cette classe de machines, qui depuis portent son nom. On remarquera que c'est bien avant la construction des premières calculatrices électroniques. On en donnera une définition intuitive qui permettra de traiter quelques exemples. Pour une introduction plus formalisée, mais encore simple, on pourra se reporter par exemple à [Gross 67].

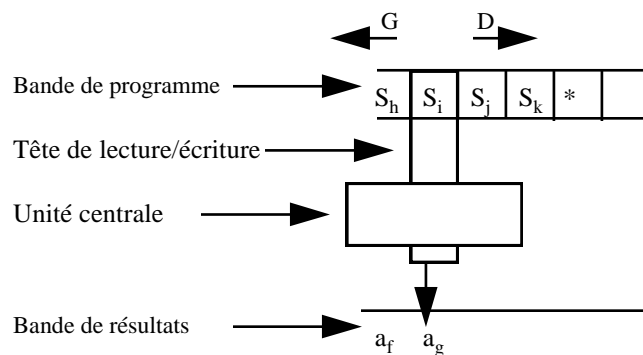


Figure 4.1. Machine de Turing

Une machine de Turing se compose de (Figure 4.1):

- Une bande (ou ruban) de programme sur laquelle sont inscrits au départ les données à traiter. La bande est divisée en cases et dans chaque case ne figure qu'un seul symbole.
- Une bande (ou ruban) de résultats où viennent s'inscrire en cours de fonctionnement les résultats des calculs (de l'exécution du programme)

- Une unité centrale, qui peut prendre (mémoriser) un certain nombre d'états internes qui correspondent aux configurations distinctes prises par la machine, qu'on peut identifier pour les besoins du programme.

- Une tête de lecture/écriture qui assure la communication entre la bande de programme, l'unité centrale et la bande de résultats. Cette tête n'opère que sur une seule case à la fois, elle peut déplacer la bande de programme à sa gauche ou à sa droite, et écrire des résultats sur la bande de résultats. Dans une situation déterminée par un état interne et par un symbole lu sur la bande de programme, la machine va évoluer en changeant d'état et en écrivant sur la bande de résultats. Des règles de transition déterminent cette évolution : elles spécifient que dans telle situation, la machine évolue de telle façon.

4.2.2. La complexité algorithmique

Reprenons maintenant notre exemple des feux de circulation. Il s'agit d'un système qui communique de l'information. Une première caractérisation de cette information a été donnée au chapitre 1, par son codage et le calcul de la quantité d'information qu'il contient, au sens de la théorie de Shannon. La théorie algorithmique de l'information cherche à définir la mesure du contenu informationnel du système de feux de circulation comme la taille du plus petit programme qui l'engendre. Maintenant qu'on dispose d'une machine capable de réaliser un programme, il faut donc construire un programme par une machine de Turing qui définit le système (informationnel) de feux de circulation. Nous allons réaliser un tel programme, et même le plus petit possible (dans un sens qui resterait à définir précisément).

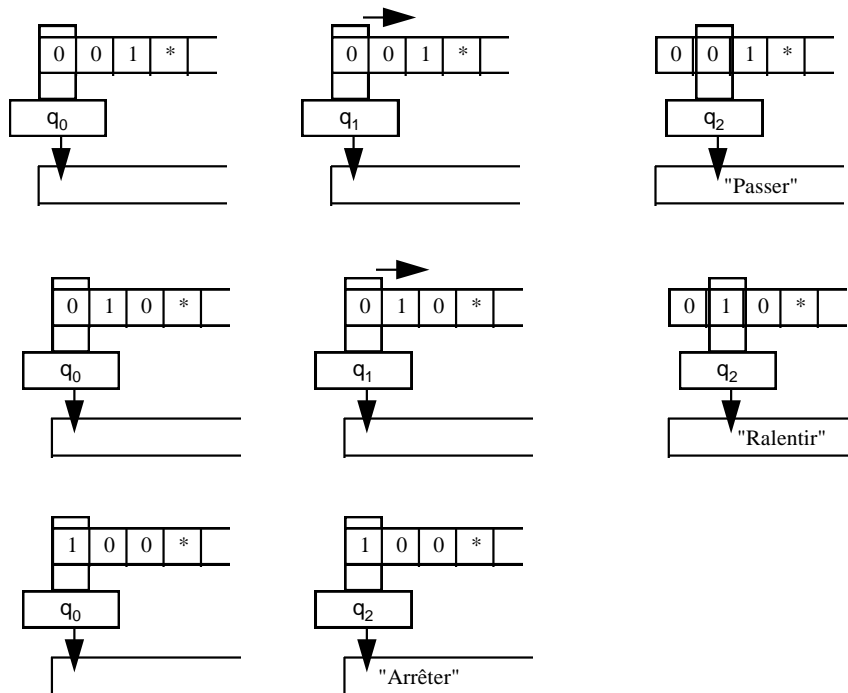


Figure 4.2. La reconnaissance des feux de circulation par une machine de Turing

Le système de feux de circulation (on prend ici les feux de premier type), est caractérisé par trois résultats attendus : "Passer" quand le feu est vert, "Ralentir" quand le feu est orange, "Arrêter" quand le feu est rouge. Pour définir les données à mettre sur la bande de programme, on peut reprendre (pour fixer les idées, mais ce n'est pas nécessaire) le codage qui a été donné au chapitre 1 : 100 pour le feu rouge, 010 pour le feu orange, 001 pour le feu vert. Ceci fait trois cases à réserver sur la bande de programme pour inscrire les données à traiter. Maintenant, on peut décrire intuitivement comment pourrait fonctionner une machine de Turing pour obtenir les résultats attendus. Si la tête de lecture lit sur la première case le chiffre 0, le feu est alors soit vert soit orange. Pour le savoir, il suffit de déplacer la bande vers la gauche et lire le second chiffre : si c'est 1, c'est que le feu est orange (le résultat est alors "Ralentir"), si c'est 0, c'est que le feu est vert (le résultat est alors "Passer"). Si par

contre la tête de lecture lit sur la première case le chiffre 1, on sait immédiatement que le feu est rouge, car c'est le seul code commençant par 1.

Donnons maintenant les règles de transition définissant la machine de Turing qui décrit le système informationnel que constitue un système de feux de circulation (Figure 4.2).

Soit q_0 l'état initial de la machine, on peut distinguer les règles de transition suivantes :

1) Dans l'état q_0 , si la tête de lecture/écriture lit 0, alors la machine déplace le ruban vers la gauche et se place dans l'état q_1 , cet état mémorise la lecture effectuée, c'est l'état "souvenir d'avoir lu 0"

2) Dans l'état q_1 , si la tête de lecture/écriture lit 0, alors la machine écrit sur le ruban *Résultats* le symbole "Passer" et se place dans un état final q_2

3) Dans l'état q_1 , si la tête de lecture/écriture lit 1, alors la machine écrit sur le ruban *Résultats* le symbole "Ralentir" et se place dans l'état final q_2

4) Dans l'état q_0 , si la tête de lecture/écriture lit 1, alors la machine écrit sur le ruban *Résultats* le symbole "Arrêter" et se place dans l'état final q_2

Remarque : On peut reconnaître la nécessité d'avoir trois états internes à mémoriser au lieu de deux - ce qui semblerait a priori plus logique -, car si à la place de l'état final q_2 on revenait à l'état initial q_0 , la machine pourrait recommencer son programme et écrire d'autres résultats faux

On appelle *complexité informationnelle* ou *complexité algorithmique* ou encore *complexité de Kolmogorov* d'un message (Passer, Ralentir, Arrêter), la longueur du plus court programme produisant ce message. Si on admet que l'on a décrit ci-dessus le plus court programme possible (ce n'est pas très difficile à admettre !), on peut donc conclure que la complexité des messages d'un système de feux de circulation est au plus 2.

On retrouve ainsi le résultat du chapitre 1, où on avait montré qu'un codage sur deux bits était suffisant pour décrire le système de feux (cf. Figure 1.3). Le rapport entre la théorie de Shannon et la théorie de Kolmogorov est en fait très étroit. Il faut d'abord voir que la notion d'information donnée par Shannon se rapporte non pas à un seul message, mais à un ensemble de messages (on pourrait donc dire au système informationnel dans sa globalité), cet ensemble de messages vérifiant une propriété de distribution probabiliste. Pour faire le lien avec la théorie de Kolmogorov, qui donne la définition de l'information contenue dans un message, il faut d'abord bien sûr munir l'ensemble des messages de la même distribution de probabilités. Un théorème dû à Chaitin montre ensuite que la moyenne pondérée par cette distribution de la complexité informationnelle de l'ensemble des messages est équivalente à la quantité d'information de ces messages au sens de Shannon (qui est elle-même également une moyenne pondérée par la distribution de probabilités). Pour plus de détails et une formulation plus formelle de ce résultat, on pourra consulter [Delahaye 94], Chap. 1, § 1.2.5.

Ce dernier résultat montre la parfaite équivalence entre la théorie shannonienne et la théorie algorithmique de l'information. Ce ne sont en fait que des visions duales l'une de l'autre, la première se plaçant du point de vue ontologique, la seconde du point de vue phénoménologique.

4.3. Le concept d'algorithme

4.3.1. La notion d'algorithme

Inventer une machine de Turing chaque fois qu'on désire décrire un système informationnel serait une tâche rédhibitoire, et bien peu opérationnelle. C'est un instrument théorique fort utile, mais cette "machine" n'a rien de réel. Elle sert en fait à formaliser la notion intuitive de programme tel qu'on en a parlé au paragraphe précédent. Il existe une manière de décrire (ou d'écrire) des programmes beaucoup plus opérationnelle, puisqu'elle peut se mettre en œuvre immédiatement sur un ordinateur. Ce sont les *algorithmes*⁴⁶. L'écriture d'un algorithme est équivalente à la construction d'une machine de Turing, pour réaliser le même traitement de l'information. Un algorithme est la "spécification d'un schéma de calcul, sous forme d'une suite finie d'opérations élémentaires obéissant à un enchaînement déterminé" (définition de l'Encyclopedia Universalis citée dans

⁴⁶ Le mot "algorithme" vient du nom d'un mathématicien perse al-Khowâ-rismî, dont l'ouvrage donnait des règles d'arithmétique sur la représentation décimale des nombres et montrait l'inutilité des tables et abaqués.

[Froidevaux 90]). Il décrit un traitement sur un certain nombre d'informations (de données) en composant un nombre fini d'opérations simples, rigoureusement définies et pouvant être effectivement réalisées par une machine (ou par l'esprit humain). On distingue donc les *structures de données* qui sont les représentations des informations à traiter, et les *structures de contrôle*, qui sont les opérations à effectuer sur ces données. Les structures de données peuvent être considérées comme un codage de l'information, au sens défini au chapitre 1, et les structures de contrôle sont exprimées par des mots simples du langage courant, bien qu'on puisse en fournir une description mathématique très formalisée.

Décrivons un algorithme équivalent au programme élaboré au paragraphe précédent grâce aux machines de Turing. Codons d'abord les informations nécessaires toujours de la même manière : 100 pour le rouge, 010 pour l'orange et 001 pour le vert. On notera X un "espace mémoire" (ou une *variable*) qui stocke le message reçu du système de feux de circulation. On représente cette réception de message par l'écriture $X \leftarrow \text{Message}$ (X reçoit "Message"). L'action à effectuer sera donc différente selon le contenu du message. Cela peut s'écrire de la manière suivante :

```
X ← Message
Si X = 100
Alors "Arrêter"
Sinon
  Si X = 010
  Alors "Ralentir"
  Sinon
    Si X = 001
    Alors "Passer"
```

Cet algorithme décrit bien la situation informationnelle des feux de circulation. En le regardant de près, on peut lui trouver quelques imperfections. D'abord, l'avant dernière ligne est redondante : il est en effet clair que si on (ou la machine) arrive à cette ligne, c'est que le message n'est ni 100, ni 010, donc nécessairement 001. On peut donc supprimer les deux dernières instructions Si et Alors. Ensuite, au niveau de l'espace mémoire occupé (la variable X), on s'aperçoit qu'on pourrait réduire cet espace en codant le message sur deux bits (cf. Figure 1.3 du chapitre 1). Mais on peut encore faire mieux en n'utilisant qu'un espace mémoire d'un seul bit : il suffit en effet de stocker le début du message c'est-à-dire son premier chiffre, si c'est 1, alors c'est le rouge, si c'est 0, il suffit de lire le chiffre suivant pour reconnaître le message, si c'est 1 alors c'est l'orange, si c'est 0 alors c'est le vert. On reconnaît ici le programme qui a été décrit par la machine de Turing du paragraphe précédent. Ce programme se décrit donc par l'algorithme suivant :

```
X ← début(Message)
Si X = 1
Alors "Arrêter"
Sinon
  X ← (suivant(Message))
  Si X = 1
  Alors "Ralentir"
  Sinon "Passer"
```

Cette description n'est pas unique, et on peut écrire d'autres algorithmes pour obtenir exactement le même traitement de l'information, par exemple :

```
X ← début(Message)
Si X = 0
Alors X ← (suivant(Message))
  Si X = 1
  Alors "Ralentir"
  Sinon "Passer"
Sinon "Arrêter"
```

On remarque dans ce dernier exemple l'intérêt de décaler l'écriture (ce qu'on appelle "l'indentation") pour bien repérer les blocs imbriqués dans les structures de contrôle. On voit aussi que l'écriture (et la lecture) d'un algorithme peut devenir très rapidement une tâche extrêmement compliquée.

Nous allons donner maintenant un autre algorithme, totalement différent, mais qui réalise le même traitement. On verra qu'il est susceptible de s'étendre à un message plus compliqué et qu'il amène à une nouvelle réflexion sur la complexité. Le message reçu est codé sur trois bits. Numérotons ces bits de 1 à 3, on notera $m(i)$ le $i^{\text{ème}}$ bit du message. On a, dans le système de feux de circulation, la configuration qu'on peut représenter par le tableau suivant :

	m(1)	m(2)	m(3)
Arrêter	1	0	0
Ralentir	0	1	0
Passer 0	0	1	

On peut donc découvrir la nature du message en lisant chaque bit, et en s'arrêtant dès qu'on a lu un 1. Le message est identifié par la place où on a lu le 1. Cette procédure se décrit par l'algorithme suivant :

```

i ← 1
X ← m(1)
Tant que X différent de 1
  X ← m(i+1)
  i ← i+1
Si i = 1
Alors "Arrêter"
Si i = 2
Alors "Ralentir"
Sinon "Passer"

```

Vérifions que cet algorithme fonctionne bien, car il est plus compliqué à comprendre que ceux écrits précédemment (ce qui prouve qu'on peut faire des algorithmes parfois plus compliqués qu'il n'est nécessaire !).

1) Supposons que le feu est rouge, donc que le message envoyé est 100. X reçoit la valeur m(1) qui est 1, et i reçoit la valeur 1 également. L'instruction "Tant que" ne s'exécute pas, puisque X=1, donc on passe à l'instruction suivante. Comme i=1 c'est la première instruction qui s'exécute, on obtient donc "Arrêter"

2) Supposons que le feu est orange, donc que le message envoyé est 010. X reçoit la valeur m(1) qui est 0, et i reçoit la valeur 1. L'instruction "Tant que" va s'exécuter ici pour une première fois, donc X reçoit m(2) qui est 1 et i reçoit la valeur 2. Ensuite, l'instruction "Tant que" ne s'exécute plus puisque X=1, on passe à l'instruction suivante. Comme i= 2, c'est la deuxième instruction "Si" qui s'exécute, on obtient donc "Ralentir"

3) Supposons que le feu est vert, donc que le message envoyé est 001. X reçoit la valeur m(1) qui est 0, et i reçoit la valeur 1. L'instruction "Tant que" va s'exécuter ici pour une première fois, donc X reçoit m(2) qui est 0 et i reçoit la valeur 2. Puisque X = 0, l'instruction "Tant que" s'exécute alors une seconde fois, donc X reçoit m(3) qui est 1 et i reçoit la valeur 3. Ensuite, l'instruction "Tant que" ne s'exécute plus puisque X=1, on passe à l'instruction suivante. Comme i= 3, les deux instructions "Si" ne peuvent s'exécuter, on obtient donc "Passer"

4.3.2. La complexité d'un algorithme

Un des intérêts d'un algorithme tel que celui qui vient d'être décrit, est de pouvoir être généralisé à un système qui comporterait plus de trois messages, qu'on pourrait coder sur n bits, et qu'on reconnaîtrait par l'emplacement du seul bit égal à 1. Dans un système similaire à celui des feux de circulation, il faudrait donc n couleurs associées à n messages. Ce système serait donc d'une complexité informationnelle d'autant plus grande que n est grand. Cependant, cette complexité n'est pas caractérisée par l'information codée (sur n bits), mais par son traitement par l'algorithme. En effet, si par exemple le premier bit est à 1, le traitement s'arrête tout de suite, il n'est pas besoin de parcourir toute la chaîne des bits pour identifier le message, ceci ne se produit que dans le cas où c'est le dernier bit qui est à 1. En général, l'algorithme effectue un parcours de longueur p, quand c'est le bit qui est à la place p qui est à 1. En moyenne (si on suppose que tous les messages sont équiprobables), pour le traitement décrit par l'algorithme, on peut dire qu'il effectue intuitivement un parcours d'une longueur équivalente à $n/2$ ($(n+1)/2$ si n est impair)⁴⁷. Si l'on est pessimiste, on peut dire qu'au pire, l'algorithme effectue un parcours de longueur n. On trouve ainsi une notion de complexité nouvelle par rapport celle qui est décrite au paragraphe précédent. On peut calculer la complexité d'un algorithme (en moyenne ou au pire), et cette complexité est caractéristique du traitement de l'information effectué sur un système informationnel. L'étude de

⁴⁷ Le calcul s'effectue de la manière suivante : il y a n données, chacune ayant une probabilité de 1/n. Pour la donnée où le bit à 1 est en place p, le parcours de l'algorithme est de longueur p. La moyenne du parcours de l'algorithme est donc :

$1/n (1 + 2 + 3 + \dots + n) = 1/n \cdot n \cdot (n+1)/2 = (n+1)/2$ qui est équivalent à $n/2$ (dans un sens mathématique quand n est assez grand).

la complexité des algorithmes est un domaine extrêmement développé de l'informatique. Sa théorie est très formalisée, et ses rudiments sont le b.a.ba de tout informaticien. Vue comme une caractérisation du traitement de l'information d'un système, la complexité d'un algorithme apporte un éclairage nouveau sur l'aspect fonctionnel de l'information. Précisons en quelques principes. Pour plus de détail et de théorie, les ouvrages sur ce sujet abondent. On peut par exemple consulter [Froidevaux 90].

Un algorithme traite des données qui codent des messages. La complexité d'un algorithme est une fonction calculée à partir de la taille des données. Quand on dit que l'algorithme est de complexité de l'ordre de n , cela signifie à peu près que pour traiter une donnée de taille n , il effectue n opérations élémentaires. Le calcul de la complexité dépend donc de la définition de la taille, et de celle des opérations élémentaires. Dans le cas de notre algorithme, on a défini la taille d'une donnée par son nombre de bits de codage. Ce n'est pas toujours pertinent, si par exemple les données sont des nombres, on peut prendre comme mesure de leur taille le nombre de chiffres. On a pris comme opération élémentaire le pas de parcours de la donnée, ce qui est assez intuitif et pas tout à fait exact, car il n'apparaît pas en tant que tel dans l'écriture de l'algorithme. Il est plus correct de prendre comme opération élémentaire l'opération dite "d'affectation" qui attribue une valeur à une variable ($X \leftarrow m(i+1)$ et $i \leftarrow (i+1)$ et éventuellement l'opération de comparaison (X différent de 1, $X = i$). Le passage par l'instruction "Tant que" coûte alors 3 dans le calcul de la complexité, le passage par une instruction "Si" coûte 1. Le calcul de la complexité s'en trouve légèrement modifié, on trouve une complexité en moyenne équivalente à $3n/2$. Ce n'est pas très différent, car ce qui est intéressant est l'ordre de grandeur de la complexité, à savoir la "vitesse" à laquelle grandissent les "difficultés" de traitement de l'algorithme (en temps d'exécution par exemple) au fur et à mesure que grandit la taille des données. Dans ce cas, on dit que l'algorithme est en $O(n)$, c'est-à-dire que son efficacité (son temps d'exécution, par exemple) varie linéairement en fonction de la taille des données. Quand la complexité d'un algorithme est en $O(n^p)$, on dit que l'algorithme est de complexité polynomiale, quand il est en $O(2^n)$ on dit qu'il est de complexité exponentielle.

La notion d'ordre de grandeur de la complexité d'un algorithme est très importante dans la pratique de la programmation des ordinateurs. Elle permet d'appréhender les problèmes qui pourront être résolus algorithmiquement avec des moyens informatiques faibles ou puissants et surtout de détecter les problèmes qui ne pourront pas être traités grâce à des algorithmes par la machine, quelle que soit sa puissance, passée ou future, et ceci malgré l'évolution constante des performances technologiques ! Ce constat est souvent source de beaucoup de désillusions pour un certain nombre de gens qui ont une approche trop naïve du traitement algorithmique de l'information. Pour illustrer ce propos, citons un exemple tiré de [Froidevaux 90]. Supposons qu'on puisse résoudre un problème avec plusieurs algorithmes, l'un de complexité $O(n)$, un autre de complexité $O(n^2)$, puis $O(n^3)$ et enfin $O(2^n)$. La figure 4.3 donne une estimation du temps d'exécution de chacun de ces algorithmes pour différentes tailles n des données du problème sur un ordinateur pouvant effectuer un million d'opérations par secondes. Ce tableau montre bien que, plus la taille des données est grande, plus les écarts se creusent entre les différents temps d'exécution.

Complexité	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(n^3)$	$O(2^n)$
$n = 100$	0,1 ms	10 ms	1 s	4. 10^{16} a
$n = 1000$	1 ms	1 s	16,6 mn	infini
$n = 10\ 000$	10 ms	100 s	11,5 j	infini
$n = 100\ 000$	0,1 s	2,7 h	31,7 a	infini
$n = 1\ 000\ 000$	1 s	11,5 j	$31,7 \cdot 10^3$ a	infini

Figure 4.3. Temps d'exécution en fonction de la complexité des algorithmes⁴⁸

⁴⁸ Infini signifie la valeur dépasse 10^{100} .

Complexité Temps calcul	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(n^3)$	$O(2^n)$
1 s	10^6	10^3	100	19
1 mn	$6 \cdot 10^7$	$77 \cdot 10^2$	390	25
1 h	$36 \cdot 10^8$	$60 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^2$	31
1 j	$86 \cdot 10^9$	$29 \cdot 10^4$	$44 \cdot 10^2$	36

Figure 4.4. Taille maximum des données traitées en fonction de la complexité

La figure 4.4 donne une estimation de la taille maximale des données que l'on peut traiter par chacun des algorithmes en un temps d'exécution fixé, pour un ordinateur effectuant un million d'opérations par seconde.

D'après ces tableaux, il est clair que certains algorithmes sont utilisables pour résoudre des problèmes sur ordinateur et pas d'autres. Pour un cas de complexité exponentielle, il est clair qu'aucun algorithme ne pourra jamais résoudre le problème posé.

Ce qui est exposé ci-dessus concerne essentiellement une complexité qui concerne le temps de traitement de l'information du système. On peut également s'intéresser à la complexité en *espace mémoire*, qui est la taille (en général calculée en bits) de la mémoire nécessaire pour pouvoir exécuter l'algorithme. Par exemple, le dernier algorithme ci-dessus est de complexité $\log_2(n) + 1$ en espace mémoire car il demande de stocker deux valeurs : $m(i)$ qui est un bit et i qui est un entier inférieur ou égal à n , qu'on sait coder sur $\log_2(n)$ bits (codage binaire des entiers). Le second algorithme qui a été donné au § 4.2.1 est de complexité 1 en espace mémoire car il ne nécessite qu'un bit pour stocker $\text{début}(\text{Message})$ ou $\text{suivant}(\text{Message})$, même si on le généralise à un message de taille n .

Il n'y a pas de rapport direct entre la complexité en temps et la complexité en espace mémoire. C'est en général plutôt un antagonisme : les algorithmes rapides sont souvent gourmands en mémoire, et les algorithmes consommant peu de mémoire effectuent plus d'opérations donc sont plus lents. Un tel problème est connu depuis longtemps, et symbolisé par le problème de l'échiquier : supposons qu'on place un grain de blé sur la première case d'un échiquier, puis qu'on en place deux sur la deuxième, puis quatre sur la troisième et qu'on multiplie ainsi par deux sur chaque case le nombre de grains qui est sur la précédente, on obtiendrait sur l'échiquier, qui comporte 64 cases, un nombre de grains supérieur à toute récolte que pourrait jamais donner la planète. L'algorithme décrivant ce problème est très simple :

```

i ← 1
X ← 1
Tant que i inférieur ou égal à 64
  X ← 2 · X
  i ← i + 1

```

La complexité en temps de cet algorithme est linéaire : pour traiter une donnée de taille n (ici $n = 64$), il faut $2n$ opérations (ce qui fait dire naïvement que c'est une opération facile à réaliser), par contre la complexité en espace mémoire est exponentielle puisque pour une donnée de taille n , il faut stocker une donnée de taille 2^n .

4.4. Complexité algorithmique et complexité des algorithmes

L'aspect fonctionnel de l'information, vu sous l'aspect du traitement de l'information d'un système informationnel, nous amène donc à la définition de deux notions importantes de complexité. Ces deux notions sont différentes, mais elles portent malheureusement presque le même nom, et peuvent prêter à confusion. C'est pourquoi nous allons en faire un bref bilan ici.

La complexité informationnelle d'un système se définit par une certaine mesure de l'information qu'elle contient. Rappelons donc que la théorie de Shannon nous a fourni, sans le dire, une mesure de cette complexité. Elle définit en effet l'entropie d'information d'un système, qui est une quantité moyenne d'information au sens des probabilités, moyenne prise sur l'ensemble des messages, donc sur le système informationnel global.

L'entropie définit donc une notion de complexité informationnelle d'un système. Cette notion, comme on l'a vu au chapitre 1, est orientée vers la transmission de l'information à un récepteur qui connaît une certaine répartition probabiliste des messages qu'il est susceptible de recevoir. Elle est attachée à la description du système informationnel en tant que tel, et aucun aspect fonctionnel ou de traitement n'apparaît dans sa définition. C'est donc une notion rattachée à l'ontologie de l'information.

La complexité algorithmique, ou complexité de Kolmogorov (ou Chaitin-Kolmogorov), définit la mesure de l'information d'un message (d'un objet, d'un système), par la taille du plus petit programme susceptible de le produire ou le lire. Cette notion s'attache donc à décrire, non pas un ensemble de messages, mais un message particulier par le traitement qu'on peut effectuer sur lui. Pour un ensemble de messages, si l'on prend la moyenne probabiliste des complexités de Kolmogorov des messages, on retrouve un équivalent de l'entropie. Les théories de Shannon et de Kolmogorov sont donc compatibles⁴⁹. La théorie de Kolmogorov présente un point de vue dual de celle de Shannon dans la mesure où elle définit l'information d'un point de vue fonctionnel : l'information est vue comme le résultat d'un programme. Une suite aléatoire par exemple (générée par un bruit) présente, dans ce sens, une complexité maximum égale essentiellement à sa longueur, car il faut la générer caractère par caractère, alors qu'une suite infinie à un seul caractère XXXX... possède une complexité minimum, puisqu'une seule instruction est suffisante pour l'engendrer. Le programme minimum trouvé (sous forme de machine de Turing, par exemple) peut être codé et évalué en bits (la bande de programme de la machine, comme au § 4.1.2 par exemple), qui donne une quantité d'information au sens de Shannon.

La notion de complexité des algorithmes si elle définit bien des propriétés fonctionnelles d'un système informationnel (quantification de la difficulté à traiter l'information d'un système), n'est pas une mesure de la quantité d'information de ce système. Elle caractérise, non pas un système donné, mais une classe de systèmes, ou plutôt une classe de problèmes. Elle définit l'augmentation asymptotique des ressources nécessaires (en calcul ou mémoire ou temps de traitement) pour traiter des cas de taille de plus en plus importante du problème considéré⁵⁰.

La complexité algorithmique et la complexité des algorithmes sont donc deux approches fonctionnelles distinctes de l'information qui concernent toutes les deux le traitement informationnel des systèmes. La première est une caractérisation intrinsèque de l'information et la seconde une caractérisation asymptotique.

4.5. Complexité physico-chimique et complexité algorithmique

La complexité des systèmes est un thème de réflexion essentiel dans les théories scientifiques actuelles (notamment en mathématiques, physique, chimie et biologie). Que l'on parle de la théorie du chaos [Bergé 84], [Dahan Dalmedico 92], des fractals [Mandelbrot 77] ou des catastrophes [Thom 72], la notion centrale est la définition et la caractérisation de la complexité des systèmes au sens le plus général possible. On a donné ci-dessus la définition d'une (et même deux) notion de complexité, au sens de l'information. Cette notion a été depuis souvent comparée à la complexité des systèmes. Il n'est pas inutile de rappeler brièvement les rapports étroits entre ces différentes théories. Les exemples et la présentation ci-dessous sont inspirés de [Nicolis 92] et [Dahan Dalmedico 92].

4.5.1. Complexité dans un système physico-chimique : les cellules de Bénard

⁴⁹ "Chacune a son rôle à jouer et par exemple dans une théorie de la mesure ou de la prise d'information. C'est le jeu complémentaire des deux théories qui doit être considéré : une situation sur laquelle on dispose de peu d'éléments ne peut être qu'assimilée à la situation typique de l'ensemble des situations compatibles avec ce que l'on sait (utilisation de la théorie de Shannon), et au fur et à mesure des précisions qu'on acquiert, c'est la théorie de Kolmogorov qui doit devenir prépondérante" [Delahaye 93], Chap.1, § 1.2.5.

⁵⁰ On pourra trouver une tentative pour définir fonctionnellement une notion de complexité qui recoupe la complexité algorithmique et la complexité en fonction de calcul, c'est la "*profondeur logique de Bennett*" définie comme "le temps de calcul du programme minimal" qui engendre l'information, qui est appelée dans [Delahaye 93], Chap.4, *complexité organisée*.

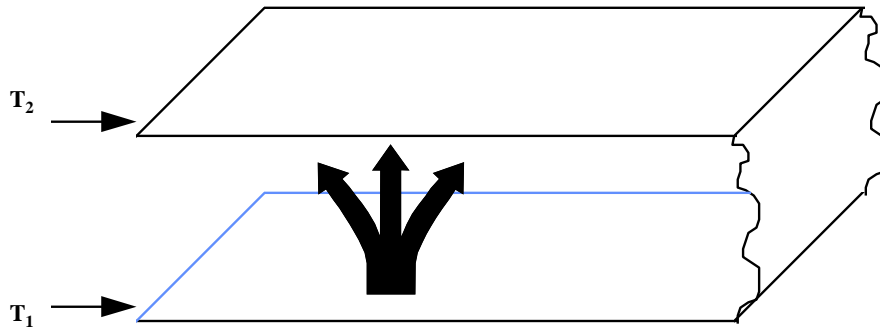


Figure 4.5 Le phénomène de conduction thermique

Un premier exemple simple et connu qui illustre le phénomène de la complexité dans les systèmes physiques est donné par une expérience élémentaire réalisée pour la première fois par le physicien français Bénard en 1900. Il s'agit d'un volume d'eau, symbolisé par ses surfaces de séparation avec l'extérieur, que l'on chauffe par la face inférieure, à une température T_1 . On communique ainsi de l'énergie sous forme de chaleur au système. Dans un premier temps, si on procède sans trop d'écart de chaleur entre le haut et le bas, il y a un simple transport de chaleur du fond vers le haut, qui est ensuite évacué vers l'extérieur de telle façon que la surface supérieure atteigne une température T_2 constante. Cette situation d'équilibre, où la température varie linéairement entre la zone chaude du fond et la zone froide du dessus, est stable. C'est ce qu'on appelle la *conduction thermique* (Figure 4.5).

Si on augmente maintenant progressivement la différence de température, à partir d'une certaine valeur, dite critique, $T_1 - T_3$, on observe une mise en mouvement de l'eau, mais qui n'est pas aléatoire : on voit apparaître une structure régulière de cellules (dites cellules de Bénard) qui tournent alternativement à droite et à gauche. C'est ce qu'on appelle le phénomène de *convection thermique* (Figure 4.6). Ces cellules sont d'une taille de l'ordre du millimètre, il s'agit donc d'une auto-organisation du système à une échelle visible. Ce phénomène est parfaitement reproductible, avec toujours la même valeur critique. On pourrait donc croire qu'il s'agit d'un phénomène déterministe, et donc intuitivement non complexe. Il n'en est rien ! En effet, si l'on se place en un point déterminé du volume d'eau, si l'on atteint la valeur critique, ce point se retrouve inclus dans une cellule de Bénard. Or, quel que soit le soin à reproduire exactement les mêmes conditions de l'expérience, on est incapable de prédire si cette cellule va tourner à droite ou à gauche. Le sens de rotation de la cellule de Bénard du point est donc un résultat qui n'est dû qu'au hasard⁵¹.

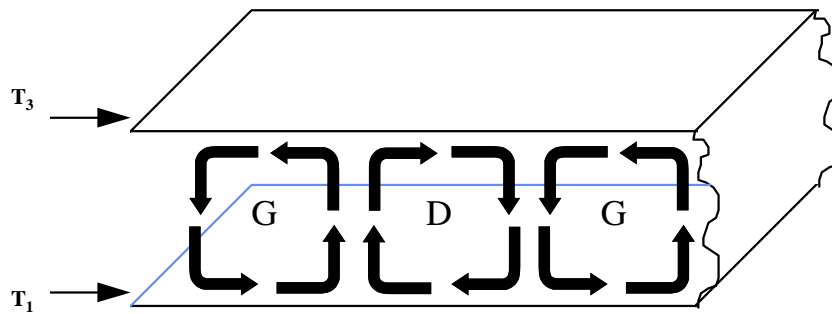


Figure 4.6. Le phénomène de convection thermique

⁵¹ "Nous arrivons ainsi à une remarquable coopération entre le hasard et le déterminisme, laquelle se manifeste à nouveau comme une réminiscence de la dualité familière en biologie depuis l'ère de Darwin (mutation - sélection naturelle)" ([Nicolis 92] Chap. 1 § 1.3).

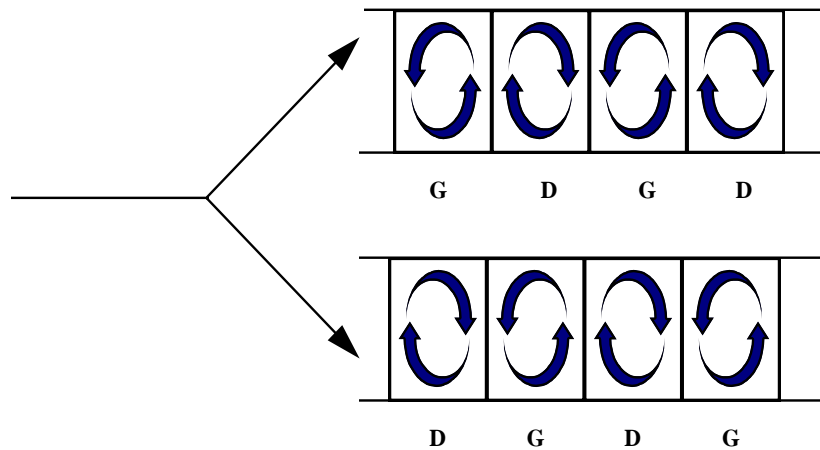


Figure 4.7.. La convection thermique (cellules de Bénard) en tant que système informationnel

Pour rendre compte de la complexité de ce type de système, on peut utiliser la théorie algorithmique de l'information. On peut dire que, pour un ensemble de valeurs de paramètres fixés, le système peut fournir plusieurs solutions de manière aléatoire (qui pourrait cependant avoir une certaine distribution de probabilités). Ces solutions sont équivalentes à la production de messages. Si on se place en un point donné, il y a deux messages possibles. Le premier correspond à une cellule contenant le point qui a son sens de rotation vers la droite, à partir de là on peut déduire les caractéristiques d'un autre point sur la base de la séquence périodique DGDGDG... (et de la valeur de longueur d'onde de ce motif de structure), le second correspond à une cellule tournant à gauche donc à la séquence GDGD... Ainsi, l'état généré par le système est caractérisé par deux messages distincts, comme ceci est représenté dans la figure 4.7. La complexité du système, calculée ici en termes de complexité algorithmique, est de l'ordre de deux en utilisant la représentation qui en est donnée ici.

Si l'on augmente progressivement le gradient de température $T_1 - T_3$, les cellules de Bénard persistent, mêmes si certaines de leurs caractéristiques sont modifiées. Puis à partir d'une autre valeur critique, nous assistons à une "nouvelle et puissante manifestation du hasard : la structure devient floue et un régime émerge, caractérisé par une dépendance erratique des variables vis à vis du temps", c'est ce qu'on appelle la *turbulence*, le système a évolué vers un état chaotique. Dans une telle expérience, "nous pouvons dire que nous avons littéralement assisté à la naissance de la complexité" ([Nicolis 92] Chap. 1 § 1.3).

Cette dernière situation peut se décrire comme la précédente en termes d'information. Il faut pour cela développer un attirail mathématique non négligeable : le système est décrit par un ensemble d'équations différentielles qui lient les variables caractéristiques du phénomène et expriment leur évolution au cours du temps. La résolution de ces équations fournit des courbes géométriques, les *trajectoires*, dessinées dans l'espace de ces variables caractéristiques (*l'espace des phases*). La disposition de ces trajectoires est typique de l'état de chaos et peut être caractérisé par des messages informationnels. Dans le cas de turbulence, ces messages sont aléatoires, donc de complexité algorithmique maximum. Dans le cas de l'expérience de Bénard (aussi appelée de Bénard-Rayleigh), le système différentiel est particulièrement simple puisqu'il ne comporte que trois équations à trois variables (appelé le *système de Lorenz*). C'est un des exemples sûrement le plus cité et le plus étudié dans la théorie du chaos (cf. [Nicolis 92] et [Dahan Dalmedico 92]). Le décrire ici amènerait à des développements formels trop importants. Pour illustrer la relation entre chaos et complexité algorithmique maximum, nous allons donner un exemple plus simple qui est celui du *gaz de Lorenz* ([Sinai 81]).

4.5.2. Complexité algorithmique et chaos : le gaz de Lorenz

Le modèle du gaz de Lorenz est l'un des exemples des systèmes dynamiques les plus instables. Ce modèle se présente comme un nombre infini de circonférences de même rayon, les diffuseurs, disposées uniformément sur un plan, et sur lesquelles se réfléchissent des particules ponctuelles se déplaçant à vitesse constante, selon la loi d'égalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion. Pour se convaincre que ce système est très instable, on peut imaginer des trajectoires issues d'un même point dans des directions voisines. Chaque trajectoire se modifie un petit peu lors des réflexions sur les diffuseurs, et leurs directions divergent

rapidement les unes des autres, ceci dépend d'ailleurs de la forme des diffuseurs (si ils sont carrés, le système est beaucoup plus stable) (figure 4.8).

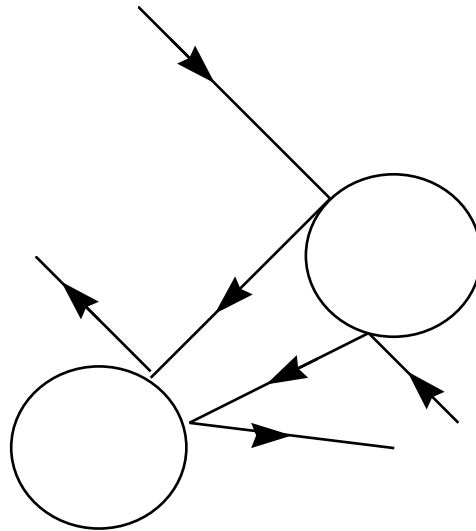


Figure 4.8. Le modèle du gaz de Lorentz

Pour traduire cette instabilité en termes d'information, on peut par exemple écrire un 1 lorsque la réflexion s'effectue sur la moitié gauche de la circonférence et 0 sur la moitié droite. La trajectoire est donc représentée en termes de message informationnel par une suite de 1 et de 0, exactement comme le résultat d'une suite de tirage aléatoire à pile ou face (1 pour pile, 0 pour face), ou une suite de bits quelconques. On montre alors effectivement que quelle que soit la suite de 1 et de 0 qu'on considère, on peut trouver une trajectoire engendrant cette suite. Ceci signifie qu'en termes d'information, le modèle du gaz de Lorentz est équivalent à la génération d'une suite aléatoire de 0 et de 1. Il est bien évident qu'une telle suite est de complexité algorithmique infinie (ou maximum) car le seul programme capable d'engendrer une suite aléatoire est celui qui consiste à énumérer un par un ses éléments.

Les deux exemples qui viennent d'être brièvement évoqués montrent le lien étroit qu'il existe entre la théorie de la complexité des systèmes dynamiques (théorie du chaos) et la théorie de la complexité algorithmique. On trouvera bien d'autres exemples dans [Nicolis 92]. Pour en revenir à notre exemple systématique des feux de circulation, il est clair que nous ne sommes pas dans un système complexe (ne parlons pas de chaos ici !), du moins dans l'approche informationnelle que nous en avons faite. Cependant, si l'on voulait pousser l'analogie, il suffirait, comme c'est d'ailleurs fait souvent actuellement, de remplacer les feux de circulation par un giratoire. On devrait normalement obtenir un désordre complet si l'on estime que les conducteurs ne sont plus guidés que par une conduite aléatoire. Il n'en est heureusement rien, bien au contraire. On assiste (comme dans l'expérience de Bénard !) à une auto-organisation de la circulation dans des configurations extrêmement variées, sous des contraintes très diverses et innombrables, sans doute imprédictibles a priori, mais qui régulent le trafic d'une manière bien plus satisfaisante et bien plus souple que le rigorisme des feux de circulation. A notre connaissance, il n'y a pas de modélisation mathématique des systèmes giratoires, mais il est fort à parier que dans ce domaine aussi on assiste à la naissance de la complexité. C'est là où l'on voit que les mots sont trompeurs, puisque le terme "chaos", voire "complexité", désigne une organisation sophistiquée qui régule des processus apparemment incontrôlables.

4.6. Le traitement de l'information : mythes et limites

4.6.1. Les limites de l'algorithmique

Le traitement de l'information, du moins tel qu'il est conçu par les informaticiens, se décline à travers l'algorithmique : l'information peut se décrire par l'algorithme qui la produit, les informations d'un cas à traiter sont gérées par les structures de contrôle d'algorithmes, les solutions de problèmes sont données par des algorithmes etc. L'algorithme, quand il apporte une solution à un problème, est un objet troublant. Il apparaît comme un outil puissant et raisonné qui ne laisse pas place au hasard, et pour cause puisque le propre de sa nature est de contenir tous les cas possibles à partir d'un certain traitement des informations. Mais c'est par là même qu'il prouve ses faiblesses. Une solution algorithmique est une solution de type analytique par excellence,

avec tout ce que cela comporte (cf. chapitre 3). Beaucoup d'algorithmes qui se sont révélés erronés ou inadéquats l'ont été parce qu'un cas non prévu s'est présenté qui les a mis en défaut. La limite est donc claire : le traitement de l'information n'est pertinent que si l'on a recueilli exhaustivement l'information sur un problème et que l'on a identifié toutes les configurations de traitement de ces informations. On retrouve donc une certaine quête du Graal de l'information qui aboutit rapidement à dire que seuls les problèmes simples (i.e. non complexes dans un sens intuitif) sont susceptibles d'être résolus par les traitements algorithmiques. Les problèmes de connaissance ne sont sûrement pas de cet ordre, et c'est dans cette optique qu'est née l'Intelligence Artificielle qui a coupé avec les voies classiques de l'algorithmique pour explorer d'autres pistes. Cependant, à voir l'intense développement que connaît encore les techniques de traitement de l'information classiques, on peut se douter que même les problèmes "simples" sont loin encore d'avoir livré toutes leurs richesses et tous leurs secrets !

De plus, l'algorithmique porte en elle-même une autre limitation : la théorie de la complexité dont elle s'est dotée montre qu'il existe des algorithmes qui ne sont pas "raisonnables". Ce sont ceux qui explorent avec une combinatoire trop grande l'ensemble des solutions possibles à un problème qui en possède justement trop. C'est le cas typique de l'échiquier. Dès lors, le traitement de l'information ne consiste plus, en grande partie, qu'à diminuer la complexité des algorithmes et à traquer impitoyablement ceux de complexité exponentielle. Il n'est pas toujours facile de montrer qu'un problème est de complexité exponentielle, mais dès que c'est démontré, le problème est rejeté comme étant impossible à résoudre. Il faudrait ajouter : impossible à résoudre en tant que problème informationnel. Et on a eu trop tendance (tendance qui perdure d'ailleurs) soit à se désintéresser des problèmes trop complexes (au sens de la complexité des algorithmes) puisqu'aucune machine ne peut les traiter, soit à dépenser beaucoup d'énergie à chercher des solutions algorithmiques de complexité raisonnable à des problèmes qui sont a priori exponentiels. Ce dernier point est parfaitement illustré par le jeu d'échecs : la solution simple, calculer tous les coups possibles à chaque pas, est de complexité évidemment exponentielle; depuis de nombreuses années on a engagé des moyens et des ressources considérables pour essayer d'écrire des programmes qui savent jouer aux échecs, donc qui réduisent cette complexité. On arrive maintenant à des programmes qui battent les plus grands champions. C'est donc une victoire du traitement de l'information. Malheureusement, c'est peut-être une victoire amère, car il semble que l'on soit revenu au point de départ. Avoir réduit la complexité informationnelle du problème n'empêchera pas les gens de continuer à jouer aux échecs à leur manière, pour exercer leur intelligence. On n'aura même pas désacralisé le jeu d'échecs, qui apparaissait comme un des jeux les plus intellectuels, avec ses surdoués et ses passionnés et qui finalement ne serait pas si dur que ça, puisque "même un ordinateur peut le faire" ! Tout au plus aura-t-on de nouveau retrouvé le problème de la connaissance, où l'on voit que l'information ne représente que la partie émergée de l'iceberg. Comme le dit Jacques Pitrat, le problème des échecs est le plus simple qui soit au niveau de la connaissance, le plus complexe étant sans doute celui du balayeur qui rencontre un portefeuille et qui sait qu'il ne faut pas le jeter mais le récupérer !

4.6.2. Le mythe de la complexité

Le mot "complexité", ainsi que des mots qui s'y rattachent fortement tels que "hasard", "chaos", "turbulence", "instabilité" ou "bifurcation" et autres "attracteurs étranges", font actuellement couler beaucoup d'encre⁵². Mais nous avons vu qu'il peut prendre des sens divers : il peut s'agir de la complexité informationnelle d'un système, de la complexité asymptotique d'un algorithme, de l'instabilité d'un système dynamique calculée par différentes grandeurs (en terme d'information, où en terme de grandeurs mathématiques dont nous n'avons pas parlé ici comme la dimension fractale, les exposants de Lyapounov, les corrélations, les résonances etc.). Nous avons également vu qu'il existe des rapports, parfois étroits, voire des équivalences, entre ces différentes notions, qui ne se recourent cependant pas toutes.

Ces notions de complexité exercent, à juste titre, une fascination formelle intense dans de nombreux courants de pensée actuels. La théorie s'est développée avec une grande rapidité et a montré combien ces notions étaient riches et fécondes dans leur potentiel de formalisation et de généralisation. On est très rapidement passé des phénomènes physico-chimiques à d'autres phénomènes qui semblent réagir à des lois similaires⁵³. Des généralisations parfois hâtives, voire douteuses (comme par exemple la modélisation des émeutes dans les

⁵² "Aujourd'hui, les textes évoquant le chaos abondent. Ils occupent une place de choix dans les vitrines des librairies et pour chaque sujet on peut trouver un texte intitulé "Le chaos et...". Tout serait-il chaos ? " [Eckman 92].

⁵³ "Comprendre ce qui se passe autour de nous revient en réalité à construire des modèles et à les confronter à nos observations[...]. Dans une telle démarche, l'une des étapes fondamentales est l'utilisation systématique d'analogies et d'archétypes [...]. Les systèmes physico-chimiques qui donnent naissance à des phénomènes (complexes) [...] peuvent servir d'archétypes. " [Nicolis 92] Chap. 6.

prisons par la théorie des catastrophes !) ont vu le jour. De nombreux domaines très divers sont traités par ces approches : science des matériaux, biologie, climatologie, insectes sociaux, systèmes humains... L'avenir dira quelle validité sera donnée à toutes ces modélisations. Ces méthodes, à caractère peu ou prou universel, ont tendance, d'une certaine manière, à s'approprier la problématique de la complexité des systèmes en général. Dans le point de vue que esquissé ici, il en va tout autrement. Si l'on se réfère à un système de connaissances, la complexité au(x) sens ci-dessus ne relève que de l'axe informationnel du système, dans sa composante phénoménologique. On peut même dire qu'en ce qui concerne la complexité algorithmique, elle est en dualité bijective avec la composante ontologique de ce même axe. Cette notion de complexité n'est donc qu'un apport partiel, même s'il est considérable, aux connaissances que l'on peut avoir sur un système (dans la problématique connaissances des systèmes/systèmes des connaissances cf.. Chap. 3). C'est en ce sens qu'on peut parler de "mythe de la complexité".

Chapitre 5

Connaissance et signification

Aspects fonctionnels

5.1. Introduction

Dans sa composante informationnelle, l'aspect structurel de la connaissance relève de l'information et l'aspect fonctionnel du traitement de l'information. Le traitement de l'information, tel qu'on vient de le voir au chapitre 4, se définit comme une description des mécanismes algorithmiques qui manipulent les données.

Dans sa composante sémantique, l'aspect structurel de la connaissance relève des structures sémantiques qui rendent compte de la génération et de l'organisation cognitive du sens, c'est-à-dire tel qu'on le modélise dans la mémoire sémantique de l'être humain. Dès lors, l'aspect fonctionnel de la sémantique relève aussi d'une perspective cognitive. Le traitement du sens se définit alors comme la description des mécanismes intellectuels qui manipulent les structures sémantiques (ou données sémantiques). C'est ainsi qu'on l'abordera dans ce chapitre.

Ce chapitre est très inspiré par l'intelligence artificielle, dans sa partie fortement liée aux sciences cognitives. C'est un choix délibéré, qui pourra paraître très restrictif, mais il est justifié par plusieurs arguments. C'est d'abord notre culture d'origine, qui a abouti aux questions évoquées dans cet ouvrage. C'est ensuite une discipline qui fournit des réflexions, qui, si elles peuvent être contestées, ont le mérite d'être formalisées (parfois trop, parfois insuffisamment il est vrai !) et procurent ainsi une bonne base de discussion. C'est enfin une science pour l'ingénieur, et c'est dans cette optique que nous alimentons notre propos. Mais là n'est sans doute pas la raison principale. L'intelligence artificielle s'est en effet toujours posée comme une alternative à la science de l'information, elle s'affirme "en rupture avec une tradition léguée par la théorie de l'information, elle assigne à la connaissance une fonction opératoire indépendante de son contenu informatif" [Ganascia 90]. A travers ses nombreux avatars, elle a toujours exploré des voies en dehors de l'algorithmique classique et en dehors de la représentation standard des données. Les représentations sémantiques des données, telles qu'elles ont été décrites au chapitre 2, forment la base de ce que l'intelligence artificielle appelle la représentation des connaissances, il est donc naturel qu'elle aborde sous cet angle de la signification le traitement de ces données. On verra dans ce chapitre, que si l'intelligence artificielle a réduit petit à petit ses ambitions de comprendre d'une manière générale les mécanismes intellectuels, elle n'a jamais abandonné son projet initial qui était de décrire des mécanismes cognitifs en liaison avec la mémoire sémantique telle qu'on a pu l'appréhender au fur et à mesure des avancées dans ce domaine.

5.2. La résolution de problèmes

5.2.1. Le "General Problem Solver"

C'est à Simon et Newell qu'on doit les premières tentatives formalisées de décrire des mécanismes intellectuels, dans le but de décrire ce que nous appelons l'aspect phénoménologique de la connaissance sur l'axe sémantique, à savoir les stratégies que met en œuvre l'intelligence humaine pour utiliser des données sémantiques. Cette utilisation sera vue, en dehors de phénomènes cognitifs qui semblent plus complexes comme par exemple la compréhension du langage, dans l'optique de résoudre un problème donné. C'est d'ailleurs dans ces termes que les auteurs parlent du sujet, puisqu'il porte le nom générique de *résolution de problème* (problem solving). L'entreprise de Simon et Newell est clairement psychologique, leur proposition se veut valide en tant qu'un modèle psychologique de la pensée humaine. Ils vont même plus loin en affirmant que "la plupart des théories de psychologie prendront la forme de programmes d'ordinateurs, ou de spécification qualitative de programmes" ([Simon 58] cité dans [Ganascia 90] Chap. 4 § 4.2.5.1). Cette affirmation audacieuse peut aujourd'hui prêter à sourire, mais elle fondait une approche nouvelle du traitement de la connaissance. C'est sur cette ambition qu'est né le programme GPS (General Problem Solving) ([Newell 63], [Newell 72]), commencé en 1957 et dont la version finale fût réalisée en 1969. Ce logiciel était le premier à séparer les méthodes générales de résolution et les connaissances spécifiques.

GPS se décompose conceptuellement en deux sections. La première dont l'objectif est "l'analyse du problème et sa réduction en un problème plus élémentaire" (directement implémentée dans le code du programme) et la seconde ayant pour but "l'application de règles spécifiques du calcul des propositions" (implémentée comme des données). Cette décomposition conceptuelle existait déjà dans un précédent logiciel LT (the logic theorist) [Newell 72] réalisé par les mêmes personnes. Cependant elle n'était pas effective dans la programmation de ce dernier, où ces deux sections étaient totalement imbriquées.

Dans GPS la description conceptuel du monde où doit se résoudre le problème posé est construite de la façon suivante :

- la donnée d'un ensemble d'états que peut prendre le système considéré,
- la donnée d'un ensemble d'opérateurs, qui permettent de changer les états du système. Un opérateur peut être structurellement décrit dans le système GPS par trois listes. La première est une liste de conditions utilisées pour déterminer s'il est possible d'appliquer l'opérateur. Ces conditions portent essentiellement sur l'état du système. On peut les considérer comme des *conditions d'application* qui, lorsqu'elles sont vérifiées, permettent d'appliquer l'opérateur à la situation dans laquelle se trouve le système. La deuxième liste et la troisième fournissent les modifications à apporter à l'environnement c'est-à-dire à l'état du système, lorsque l'opérateur est appliqué. L'une donne l'ensemble des propositions à retrancher de la description de l'état, les *retraits*, et l'autre donne l'ensemble des propositions à ajouter à cette même description, les *ajouts*.

Pour donner un exemple, reprenons des éléments de signification attachés à un système de feux de circulation, tels qu'ils ont été élaborés dans le chapitre 2. Nous caractériserons ces données par des expressions portant sur les valeurs de l'accélération (G) et de la vitesse (V) d'un véhicule. La description des états et des opérateurs est donnée dans les figures 5.1 et 5.2.

Etat du système	Caractérisation
Passage	$V > 0 \quad G > 0$
Arrêt	$V > 0 \quad G < 0$
Attente	$V = 0 \quad G = 0$
Départ	$V = 0 \quad G > 0$

Figure 5.1. Description des états du système

Opérateur	Conditions	Retraits	Ajouts
Ralenti	$G > 0$ ou $G = 0$	$G > 0$ ou $G = 0$	$G < 0$
S'arrête	$G < 0$ ou $G = 0$	$G < 0$ et $V > 0$	$G = 0$ et $V = 0$
Accélérer	$G < 0$ ou $G = 0$	$G < 0$ ou $G = 0$	$G > 0$
Piler	$G > 0$ et $V > 0$	$G > 0$ et $V > 0$	$G = 0$ et $V = 0$

Figure 5.2. Description des opérateurs du système

Un problème est défini par un *état initial*, donné par un ensemble de propositions permettant de décrire les différentes composantes du problème avec leurs valeurs au début de la résolution du problème et un *état final* qui correspond au but qu'on s'est fixé ou à l'objectif qu'on désire atteindre, ce dernier se décrit en terme de propositions de façon analogue à l'état initial.

Dans l'exemple ci-dessus, on peut prendre comme état initial l'état "Passage" ($V > 0$ et $G > 0$), et l'état final "Arrêt" ($V = 0$ et $G = 0$). Le problème est donc celui posé au conducteur qui désire s'arrêter à une intersection. La difficulté du problème peut se mesurer par une "distance" entre l'état initial et l'état final. Ici, si l'on prend pour distance le nombre de propositions différentes dans les deux états, la distance est de 2 (donc maximum).

La résolution d'un problème ne consiste donc plus qu'à trouver une bonne séquence d'opérateurs permettant de passer de l'état initial à l'état final. Pour cela GPS utilise deux principes fondamentaux : l'*analyse des fins et des moyens* (means-ends analysis) qui permet de décider quel opérateur utiliser pour continuer la résolution, et la *résolution récursive* qui peut être caractérisée par l'algorithme de recherche de solutions. La résolution du problème se fait par réduction successive de la "distance" entre l'état où le système se trouve et l'état que l'on veut atteindre (le but). Le problème est résolu lorsque cette distance est nulle. On appelle alors solution, la séquence d'opérateurs permettant le passage de l'état initial à l'état final. La résolution de problèmes, mise en œuvre selon ces principes, peut se décrire par un algorithme très général:

- 1 - Déterminer la distance d qui sépare l'état courant, de l'état final.
- 2 - Si $d = 0$
Alors On a une solution et on arrête
Sinon 3.
- 3 - Déterminer l'ensemble des opérateurs qui réduisent la distance d
- 4 - Choisir un opérateur dans cet ensemble et appliquer l'opérateur choisi
- 5 - repartir en 1.

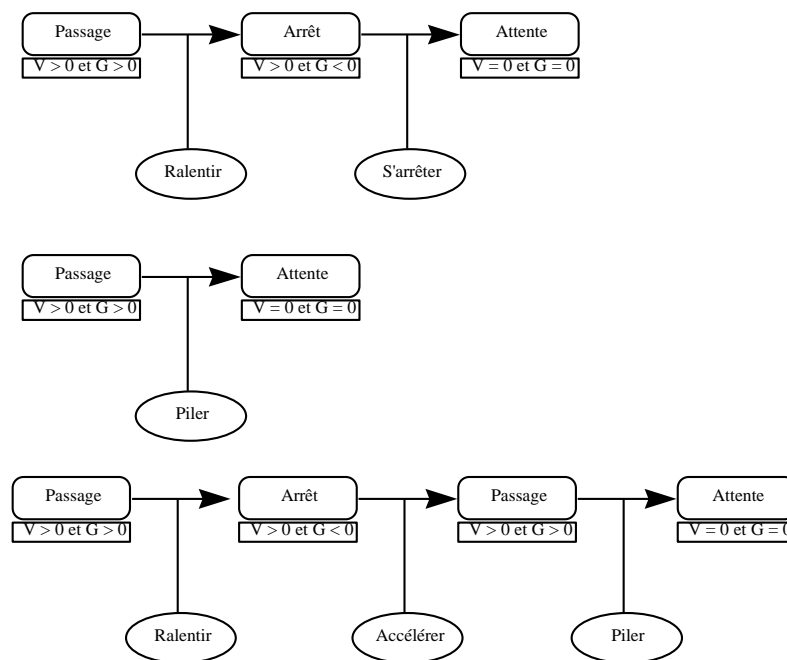


Figure 5.3. Différentes solutions possibles dans la résolution du problème

Si l'on applique cet algorithme au cas ci-dessus, on voit que la manière de choisir l'opérateur adéquat au 4° détermine fortement le type de solution qu'on obtient. Voici par exemple quelques solutions possibles (Figure 5.3), où l'on notera qu'on a pris la réduction de distance au sens large, un opérateur pouvant conserver la distance entre deux états :

Analysons maintenant en termes de stratégie, et non plus de manière algorithmique, la manière de résoudre un problème proposée par le GPS. La résolution d'un problème passe par l'accomplissement des buts suivants :

- Transformer un état A en un état B
- Réduire la différence entre A et B par transformation de A en un autre état A'.
- Déterminer un opérateur de réduction adéquat pour transformer A en A'.
- Appliquer un opérateur à A permettant sa transformation en A'.

La stratégie du GPS peut donc se spécifier par une hiérarchisation de ces buts, en associant des méthodes associées à ces buts, comme le montre par exemple la figure 5.4. On obtient de cette manière une représentation générique très générale de la manière de résoudre un problème.

C'est sans doute cet exemple qui constitue la première tentative de représenter formellement des mécanismes généraux de certains processus mentaux qui manipulent des connaissances, dans leur composante sémantique et non pas informationnelle. On est loin de donner maintenant une quelconque universalité à ce modèle, à qui l'on peut reconnaître rapidement quelques défauts. GPS permet de réduire un problème en un problème plus élémentaire par le biais d'une action, il ne permet cependant pas la décomposition d'un problème en un ensemble de sous-problèmes. D'autre part, dans GPS, le choix de la stratégie de résolution n'est pas toujours satisfaisant. Prenons le cas d'un problème d'échecs où la solution "évidente" pour un bon joueur est d'effectuer un sacrifice de pièce (la reine par exemple). Le même problème soumis à GPS n'apporterait pas cette solution car GPS ayant une stratégie par réduction de la distance (la distance étant ici mesurée par l'avantage sur l'adversaire en un coup), ne pourrait envisager comme possible la progression de cette distance en sacrifiant la pièce. De même pour les résolutions de problèmes où l'on est obligé de s'écarter d'abord de la solution avant de pouvoir l'atteindre. Un autre inconvénient, lié à la conception même de GPS, est que certains problèmes n'ont pas nécessairement de solution. Dans ce cadre là on peut difficilement formuler l'état correspondant au but à atteindre ! Cela va à l'encontre de la notion même de généralité dont les auteurs ont qualifié leur programme. Notons encore que dans certains cas on peut vouloir approcher un but, même si ce but ne peut être atteint. Il est alors intéressant de trouver une séquence d'opérateurs permettant de parvenir à un état "plus proche" du but recherché que l'état initial. Dans ce cas de figure, GPS ne trouve pas de solution mais il peut être modifié pour conserver l'état le plus proche du but (c'est-à-dire l'état dont la distance par rapport au but à atteindre est la plus petite).

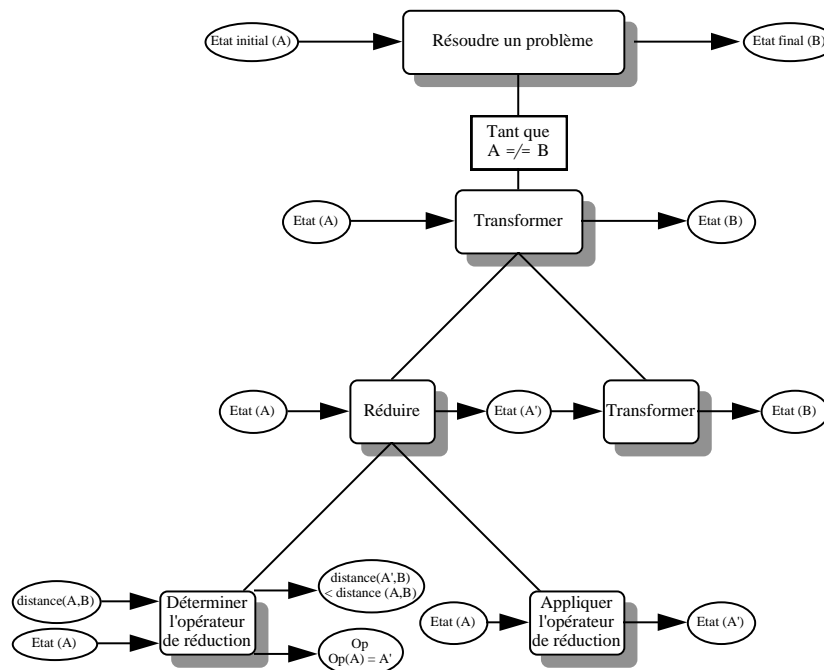


Figure 5.4. Stratégie générale de résolution d'un problème selon GPS

Des comparaisons ont été faites en psychologie pour valider ce modèle de résolution de problèmes. Bien sûr, des lacunes sont apparues (cf. [Ganascia 90]). Cependant, malgré ses ambitions exagérées, le GPS a prouvé que qu'on "pouvait reproduire artificiellement des activités qui, pour s'accomplir naturellement auraient requis l'intervention d'un être doté d'intelligence [...]. Il rend bien compte de l'activité du sujet en situation de résolution de problèmes, (mais) ce modèle est limité à des situations abstraites" ([Ganascia 90]).

Ce modèle nous intéresse en tant que modèle de traitement de la connaissance dépassant largement le cadre du traitement de l'information⁵⁴.

⁵⁴ "il a [aussi] aidé à éclaircir notre compréhension de l'activité cognitive humaine" ([Ganascia 90] Chap. 4 § 4.2.5.1)

5.2.2. Les systèmes de planification

La résolution de problèmes, telle que l'envisage GPS, est en fait assez particulière. Elle consiste à déterminer une suite d'opérations connues, qui permet de passer d'un état initial à un état final. C'est ce qu'on appelle la *génération de plan d'action* ou *planification*. Comme on l'a vu, GPS est un modèle de planification assez simple. De nombreux travaux se sont ensuite développés pour sophistication ce modèle, et ont été appliqués essentiellement dans le domaine de la robotique avec comme problème type à résoudre le problème appelé le "monde de cubes" : des cubes différents sont empilés d'une certaine manière (état initial) et un robot doit les disposer d'une autre manière (état final) en utilisant des opérations élémentaires de préhension, dépilement et empilement (on voit qu'on est loin des problèmes généraux au sens intuitif !).

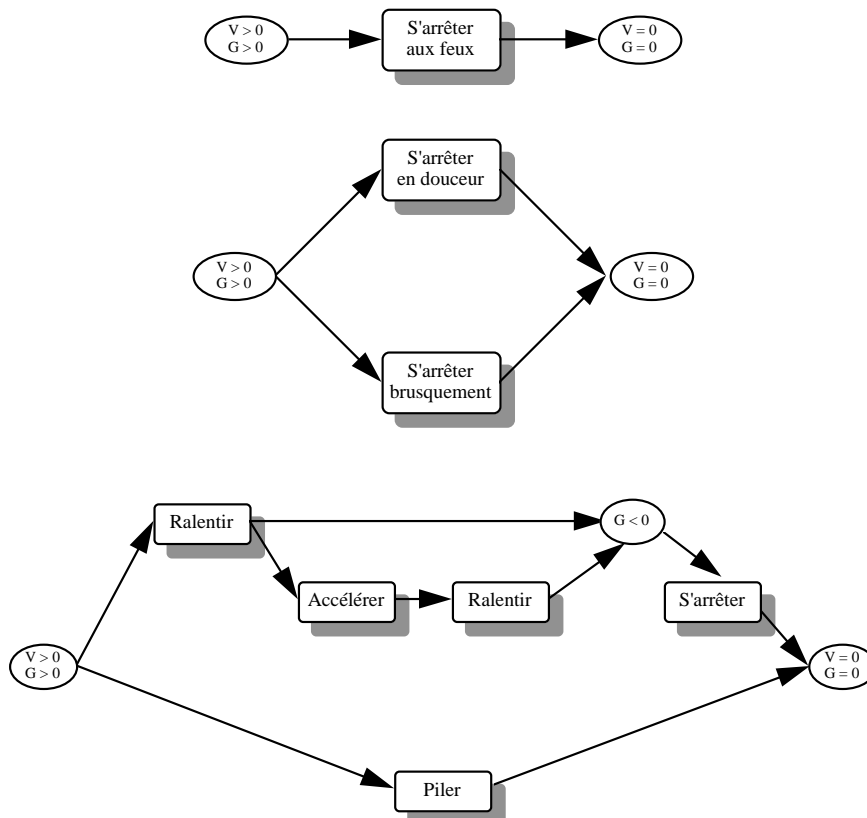


Figure 5.5. Planification hiérarchique

Le premier type de système de planification réalisé a été STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver), écrit par Fikes et Nilson en 1971 [Fikes 71]. Basé sur les mêmes idées que GPS, des différences notables peuvent y être cependant remarquées. En premier lieu, les opérations, décrites très simplement dans GPS deviennent plus complexes dans STRIPS, où on voit apparaître pour la première fois la notion de *tâche*. Un opérateur dans STRIPS est associé à une tâche ou une action, il possède des préconditions. Par exemple, pour l'action "prendre une boîte", une précondition est "être près de la boîte", ou encore "Il n'y a rien sur la boîte". La liste des préconditions de STRIPS est différente de la liste de conditions de GPS dans le sens où, dans GPS, elle est principalement utilisée pour sélectionner les opérateurs utilisables, alors que dans le cadre de STRIPS la vérification d'une précondition peut aboutir au déclenchement d'une tâche ayant pour objectif de vérifier une ou plusieurs de ces préconditions. Par contre les listes de modifications de l'environnement liées à un opérateur ont des fonctions identiques au modèle GPS, l'une permet de retrancher des éléments de la description du monde du robot, l'autre d'y en ajouter. La stratégie de STRIPS est légèrement différente de celle de GPS car si ce dernier essaie de trouver une solution en réduisant la différence qui existe entre l'état dans lequel il se trouve, et l'état qu'il veut atteindre, STRIPS lui, fonctionne en partant d'un but (problème à résoudre) et connaissant les opérateurs qui le réalisent, essaie de vérifier si l'opérateur est applicable par le biais de ses préconditions. Ceci aboutit alors à la reformulation du problème initial en un problème plus élémentaire. Les reproches que l'on peut faire à STRIPS sont pratiquement les mêmes que ceux faits à GPS, excepté pour le contrôle assuré par les préconditions.

Le second type de système de planification réalisé a été NOAH (Network of Action Hierarchies), écrit par Sacerdoti en 1975 [Sacerdoti 77]. Ce programme utilise le principe de la *planification hiérarchique*. Il se démarque de STRIPS et de GPS car il permet une recherche et une décomposition de façon hiérarchique. La stratégie est donc nettement différente de celles rencontrées dans les programmes précédents. Il établit tout d'abord un plan de haut niveau à la manière de STRIPS (reformulation du problème initial en un ou plusieurs problèmes plus élémentaires) puis récursivement traite les éléments de ce plan qui sont à leur tour décomposables en sous-problèmes, et ce jusqu'à ce que les problèmes à traiter soient solubles par des tâches élémentaires dont toutes les préconditions sont vérifiées. Le résultat fourni par la résolution d'un problème avec NOAH est un plan étendu dans lequel l'exécution n'est plus forcément linéaire comme dans les précédents modèles. Dans ces derniers on établissait un plan hiérarchique ou linéaire, mais l'exécution de ce plan était vue comme une séquence (donc quelque chose de linéaire) d'opérateurs à appliquer à un environnement, ce qui permettait d'atteindre l'objectif fixé. Dans NOAH, la démarche est toute autre.

Dans un premier temps, on part d'un but principal à atteindre de façon similaire à GPS, puis on développe ce but principal à l'aide de fonctions d'expansion qui lui sont attachées. Ces fonctions permettent d'étendre ce but en un réseau de procédures constituant à leur tour des sous-buts plus élémentaires. Dans le plan ainsi obtenu, les tâches qui ne possèdent pas de contraintes d'ordonnement sont placées en parallèle. NOAH applique ce schéma récursif jusqu'au niveau de précision désiré par l'utilisateur. On reprend pour illustrer l'exemple de l'arrêt aux feux de circulation, avec plusieurs conduites possibles pour plusieurs véhicules (Figure 5.5).

Ensuite dans un second temps, le système vérifie à l'aide de procédures appelées "critiques" s'il n'existe pas de problèmes de conflits provenant de préconditions (contraintes temporelles d'exécution ou autres) attachées aux procédures. Ceci permet la détection d'éventuelles incohérences. On peut imaginer par exemple qu'il y ait incompatibilité entre des véhicules qui s'arrêtent et des véhicules qui pilent, les premiers devant effectuer leur manœuvre impérativement avant les seconds sous peine de collision. En introduisant cette condition en termes de préconditions, d'ajouts ou de retraites, le réseau va alors être modifié pour tenir compte de cette contrainte d'ordonnement (Figure 5.6).

Le principal problème d'une telle modélisation est le choix de la fonction d'expansion, du but en sous-buts, ce choix doit faire appel comme pour les modèles précédents, à des mécanismes de prise de décisions qui doivent permettre de choisir telle ou telle fonction d'expansion en tenant compte de critères ou d'arguments de poids différents. Sa structure hiérarchique permet de répondre, au besoin, de fournir des plans dont le détail peut être adapté en fonction de l'expérience et des connaissances de l'utilisateur. De par cette capacité, NOAH fournit un outil très intéressant pour la formation. Il se transforme alors en un véritable instructeur qui peut guider l'utilisateur quel que soit son niveau et ce, de façon très efficace. Cela permet au système de donner des instructions très générales à une personne qualifiée, et des instructions plus détaillées à une personne moins spécialisée. Par exemple il peut dire "démonter le moteur de telle voiture" à un mécanicien confirmé, alors que pour un apprenti, il lui faudra donner la séquence des opérations de démontage nécessaire à la dépose du moteur.

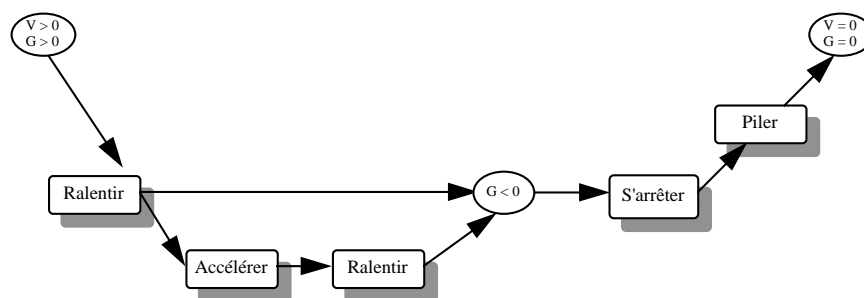


Figure 5.6. Plan d'action après la vérification des contraintes d'ordonnement

Le thème de la résolution de problèmes, qui voulait dans GPS modéliser les mécanismes intellectuels de traitement de la connaissance, a donc fortement évolué dans les systèmes de planification qui ont suivi. La validité psychologique a été largement abandonnée au profit d'une opérationnalité et d'une formalisation accrue. Des différentes évolutions, quelques concepts forts sont apparus : la notion d'opérateurs s'est complexifiée pour donner une notion plus proche des tâches cognitives comme on en parlera plus loin. Ces tâches sont organisées en plans qui décrivent leur succession dans la résolution de problèmes. Ces plans ne se décrivent pas comme une simple suite linéaire d'opérations, mais peuvent contenir des actions qui peuvent être exécutées en parallèle (*planification non linéaire*). De plus, ces plans peuvent être hiérarchisés, c'est-à-dire qu'une action peut être

décomposée en un autre plan d'action, ceci jusqu'au degré de raffinement choisi (*planification hiérarchique*). On obtient bien ainsi une représentation formelle et "automatisable" relativement complexe d'une méthode générique de résolution de problèmes.

Cependant, si cette méthode est bien adaptée pour résoudre certains problèmes (en robotique, par exemple), on est loin du compte quant à une modélisation psychologique telle que l'ambitionnaient Newell et Simon. L'évolution des méthodes ne permet plus, pour l'instant, de les spécifier en termes de stratégies compréhensibles cognitivement, comme cela a été fait simplement par exemple dans la figure 5.4. Au contraire, les méthodes sont spécifiées dans une algorithmique de plus en plus compliquée, ou axiomatisées dans des logiques très formelles (cf. par exemple [Chapman 87]). De plus, beaucoup d'aspects, mis en exergue depuis par des travaux de psychologie cognitive ou d'intelligence artificielle sont ignorés, tels que la stratégie d'exécution des plans d'actions, la difficulté de modéliser par états un domaine réel (la réalité est loin du monde des cubes!), les processus de décision bien plus complexes que celui proposé à partir des préconditions, l'élaboration du plan d'actions au fur et à mesure de son déroulement et non pas a priori, etc.

5.3. De la résolution de problèmes aux tâches cognitives

5.3.1. L'ergonomie cognitive et l'analyse de tâches

Dans les années 80, un certain nombre de psychologues et d'ingénieurs, chercheurs et praticiens, se sont attachés à résoudre des problèmes qui sont apparus suite à la complexité de plus en plus grande des systèmes industriels, qu'il s'agisse de process industriels ou de systèmes logiciels. C'est ce type de problème qu'on regroupe sous l'appellation générale *d'interaction (ou interface) homme/machine* (le mot machine est à prendre ici au sens large d'*artefact*), et qui fait maintenant partie de l'*ergonomie*. Il s'agit en effet de la difficulté pour les opérateurs, les utilisateurs à maîtriser les artefacts qui sont mis à leur disposition pour les aider à résoudre leur problème. Ainsi formulé, ceci ressemble à une plaisanterie : on fournit ainsi aux humains des machines qui sont là pour les assister mais qu'ils sont incapables de maîtriser ! La contradiction n'est bien sûr pas aussi criante que ça, mais quiconque a déjà piloté un processus complexe, ou utilisé un logiciel important a ressenti ce malaise. Ce dernier ne vient pas nécessairement directement du problème à résoudre, ou du système conçu, mais de la relation (pourtant inévitable !) entre les deux.

On s'est d'abord intéressé au problème de l'interaction en s'orientant vers le système. Les premiers travaux dans ce domaine ont consisté à mettre en valeur les diverses fonctionnalités du système dans lequel les utilisateurs opèrent. Un exemple typique est la modélisation des actions que peut faire un utilisateur sur un système, par le biais d'une interface, cette dernière faisant appel à un ensemble de périphériques d'entrée et de sortie qui permet à l'utilisateur de réaliser un certain nombre d'actions et d'en contrôler le fonctionnement. Ce type d'approche favorise la description des fonctions dont dispose l'utilisateur. Cette description fonctionnelle des tâches est le plus souvent réalisée à l'aide de grammaires formelles. Ces dernières constituent des modèles facilement implémentables et fournissent à l'utilisateur, un moyen de description modulaire. Les modèles les plus connus sont les modèles BNF (Backus-Naur Form) de Reisner, TAG (Task Action Grammar) de Payne et Green, CLG (Command Language Grammar) de Moran. Nous ne détaillerons pas plus avant ces travaux, assez loin de nos préoccupations, on pourra consulter par exemple une étude comparative dans ([Ermine 93], tome 2, chapitre 1). Les inconvénients de ce type d'approche, du fait de leur aspect délibérément tourné vers le système, proviennent de ce qu'elle ne considère que les interactions directes avec la machine, situées à des niveaux inférieurs d'abstraction. Dans notre optique, elle n'a donc rien à voir avec la traitement des données sémantiques d'un problème.

On s'est ensuite intéressé au problème de l'interaction en s'orientant vers la résolution du problème de l'utilisateur, et le rapport avec les travaux évoqués au paragraphe précédent s'est imposé naturellement. L'idée fondamentale de cette approche est de décrire l'action de l'utilisateur non pas comme asservie aux fonctionnalités d'un système donné ou en conception, mais comme une *tâche cognitive*, à un niveau d'abstraction indépendant de la machine. On retombe donc sur le problème du paragraphe précédent, celui de la modélisation de tâches de résolution de problèmes. Le problème de l'*ergonomie cognitive* est donc de construire des méthodologies d'*analyse de tâches* qui rendent compte de l'activité des utilisateurs de systèmes complexes. Il s'agit donc bien de décrire leur manière d'utiliser les connaissances, qu'ils ont (ou devraient avoir) sur ces systèmes afin de résoudre une question particulière. Les méthodes élaborées ces dernières années dans ce sens, pour avoir un but nettement plus ciblé que GPS, n'en ont pas moins une portée générale sur la modélisation du traitement des données sémantiques d'un système. Nous allons en décrire quelques unes significatives.

5.3.2. Le modèle de gestion de tâches GOMS (Goals, Operators, Methods, Selection).

Le modèle GOMS constitue la référence pour ceux qui s'intéressent à une analyse de tâches. Ce système a été développé par Card, Moran et Newell en 1983 [Card 83]. Il modélise la résolution de problèmes avec une approche centrée sur les tâches. Ces dernières sont structurées par un ensemble de buts (Goals) qui modélise les objectifs que peut remplir la tâche, un ensemble d'opérateurs (Operators) qui modélise les actions élémentaires, un ensemble de méthodes (Methods) qui permet la réalisation d'objectifs et un ensemble de règles de sélection (Selection) qui permet de choisir parmi les différentes méthodes, la plus satisfaisante pour atteindre le but souhaité. Une telle organisation favorise la structuration hiérarchique des buts en sous-buts selon des critères de sélection qui sont rassemblés en méthodes auxquelles on peut associer des critères de sélection.

Reprenons (partiellement) comme exemple la conduite à une intersection, telle qu'elle est décrite sémantiquement dans le réseau 2.9 du chapitre 2 (Figure 5.7). Les buts sont écrits en caractères italiques et les opérateurs sont soulignés. La modélisation GOMS est un calque fidèle du réseau sémantique de référence, auquel est associé un ensemble de règles de sélection qui permettent d'en faire un traitement générique. Il s'agit donc clairement, comme dans GPS, d'une méthode de traitement des données sémantiques.

But		: <i>Conduire à une intersection</i>
Méthode	: <u>passer</u>	règle sélection : le feu est au vert
Méthode	: <i>S'arrêter</i>	règle sélection : le feu est à l'orange
Méthode	: <i>Rester</i>	règle sélection : le feu est au rouge
But		: <i>S'arrêter</i>
Méthode	: <i>S'arrêter en douceur</i>	règle sélection : il n'y a pas d'obstacle
Méthode	: <i>S'arrêter brusquement</i>	règle sélection : il y a un obstacle
But		: <i>S'arrêter en douceur</i>
Méthode	: <u>freiner + rétrograder</u>	
But		: <i>S'arrêter brusquement</i>
Méthode	: <u>piler</u>	règle sélection : le véhicule est maîtrisé
Méthode	: <u>heurter un obstacle</u>	règle sélection : le véhicule n'est pas maîtrisé
But		: <i>Rester</i>
Méthode	: <u>rester au point mort</u>	règle sélection : le temps d'attente prévue est court
Méthode	: <u>arrêter le moteur</u>	règle sélection : le temps d'attente prévue est long

Figure 5.7. Modélisation GOMS de la conduite à une intersection

Voyons ensuite quel est le programme de traitement que fournit GOMS (Figure 5.8). Ce traitement revient à appliquer dans l'ordre les opérateurs rencontrés en faisant un parcours (dit en profondeur) de l'arbre des buts, sous-buts et opérateurs. Voici une écriture du programme de traitement. Ce n'est pas la forme algorithmique qui est décrite ici, qui serait trop lourde à lire, mais un ensemble de règles à la manière d'un système expert qui choisirait celle qui est utilisable dans un état donné du traitement. Le traitement part d'une commande, et en déduit des actions à réaliser ou des résultats sur l'état du système. Les variables sont écrites en majuscules. Nous ne donnerons ici, ni les mécanismes de décision intégrés en plus à ce modèle (ligne *), ni les règles de vérification des conditions d'application (ligne **), ces éléments sont cependant très importants et peuvent déterminer des caractéristiques essentielles du traitement.

si	<i>commande</i> : satisfaire BUT
et	BUT est satisfait
alors	continuer
si	<i>commande</i> : satisfaire BUT
et	BUT n'est pas satisfait
et	BUT est un opérateur

alors	exécuter opérateur BUT
si	<i>commande</i> : satisfaire BUT
et	BUT n'est pas satisfait
et	méthodes de BUT incluent METHODE
et	conditions d'application de METHODE ne sont pas contre-indiquées **
alors	méthodes possibles de BUT incluent METHODE
et	choisir méthode ayant pour but BUT *
et	exécuter méthode choisie ayant pur but BUT
si	<i>commande</i> : exécuter méthode choisie ayant pour but BUT
et	méthode courante de BUT est METHODE
et	dernier but de METHODE satisfait est DERNIER BUT
et	DERNIER BUT est satisfait
et	pas de suivant de DERNIER BUT pour METHODE
alors	BUT est satisfait
si	<i>commande</i> : exécuter méthode choisie ayant pour but BUT
et	méthode courante de BUT est METHODE
et	pas de dernier but de METHODE satisfait
et	premier but pour METHODE est PREMIER BUT
alors	satisfaire PREMIER BUT
si	<i>commande</i> : exécuter méthode choisie ayant pour but BUT
et	méthode courante de BUT est METHODE
et	dernier but de METHODE satisfait est DERNIER BUT
et	DERNIER BUT est satisfait
et	suivant de DERNIER BUT pour METHODE est BUT SUIVANT
alors	satisfaire BUT SUIVANT
si.	<i>commande</i> : exécuter opérateur BUT
alors	exécute BUT
et	BUT est satisfait

Figure 5.8. *Traitement de la modélisation par GOMS*

Une des lacunes de GOMS est le manque de mécanismes d'aide à la décision qui permet de juger du "pourquoi" et du "pourquoi pas" du choix de telle ou telle méthode à l'aide d'arguments et de critères. Un autre problème est que la seule exécution possible des opérateurs et des buts, est le séquençement géré par des méthodes. Il serait intéressant de posséder des opérateurs plus sophistiqués permettant les exécutions dans un ordre quelconque, en parallèle, ou de manière enchaînée ou non, etc. Cela serait bien mieux adapté à la modélisation des plans d'actions comme dans les avatars de GPS. Enfin, par rapport à la problématique de l'interaction homme/machine, les problèmes posés par une reformulation ou une modification des objectifs restent sans réponse avec des modèles comme GOMS, et ce à cause de leur rigidité. Dans de tels modèles, c'est l'utilisateur qui est contraint par le système et il peut difficilement agir dessus. La notion de contrôle de l'utilisateur sur le système y est absente, ce qui est loin de satisfaire l'utilisateur d'un système complexe où, effectivement, il est souvent indispensable de prendre en compte de nouveaux problèmes, de passer d'un problème à un autre, etc.

5.3.3. Le modèle MAD (Méthode Analytique de Description des tâches).

Le problème de l'interaction homme/machine vue comme une tâche cognitive de résolution de problème a amené naturellement les chercheurs à utiliser les méthodes et les techniques de la résolution générale de problèmes et de la planification hiérarchique, dérivées de GPS (cf. paragraphe précédent). C'est d'ailleurs un des spécialistes de la planification, R.E. Fikes qui a réalisé les premiers travaux dans ce sens, sur l'analyse des tâches de bureau ([Fikes 82]). Reprenant ces idées, une équipe d'ergonomes a développé une méthodologie d'analyse et un formalisme de représentation de tâches cognitives basé sur les concepts de planification hiérarchique la méthode MAD ([Scapin 90], [Sébillotte 83 et 91]). Ce système est basé sur le concept de tâche. Il a pour but la représentation des traitements procéduraux par des objets structurés, les applications visées sont essentiellement dans le domaine de la spécification et de la validation d'interfaces logicielles. Les tâches constituent les objets de base de ce système, elles permettent la représentation et la modélisation aussi bien des actions élémentaires que des traitements complexes auxquels l'utilisateur a recours. Le système MAD utilise le principe de planification hiérarchique avec comme évolution la prise en compte des problèmes posés par les contraintes temporelles qui existent entre les différentes tâches. Le formalisme utilisé par MAD revêt une dimension "logico-temporelle", au travers d'une décomposition hiérarchique des tâches.

On a principalement deux types de tâches : les *tâches simples ou terminales* qui correspondent aux traitements élémentaires, et se caractérisent par une méthode d'exécution correspondant à une action et les *tâches composées* qui correspondent aux traitements complexes, obtenus par une structuration de la tâche en sous-tâches plus spécifiques. La décomposition en sous-tâches fait ici appel à une décomposition hiérarchique dont les noeuds ne sont plus seulement des ET et des OU, et des opérateurs temporels d'ordonnancement permettant de définir un ordre d'exécution sur les sous-tâches. Les opérateurs utilisés dans MAD sont les suivants :

- *) *parallèle* : permettant l'exécution de tâches dans n'importe quel ordre (éventuellement en parallèle).
- *) *séquence* : pour exécuter des tâches les unes après les autres dans un ordre donné.
- *) *boucle* : pour représenter des tâches itératives dont les conditions d'arrêt sont fournies par la vérification des postconditions.
- *) *alternative* : pour matérialiser un choix entre différentes alternatives.

Une tâche dans le système MAD est définie par la donnée d'un certain nombre d'attributs valués :

- *) *Le nom de la tâche*
- *) *L'état initial* (liste des arguments d'entrée de la tâche)
- *) *L'état final* (liste des arguments de sortie de la tâche)
- *) *Le but* (objectif de la tâche qui est ici une partie des éléments de l'état final)
- *) *Les préconditions* (contraintes sur les éléments de l'état initial à vérifier avant de passer à la phase d'exécution de la tâche)
- *) *Les postconditions* (contraintes sur les éléments de l'état final à vérifier après avoir achevé la phase d'exécution de la tâche)
- *) *Le corps* (expression qui fournit la méthode d'exécution de la tâche)

Par exemple, la tâche " S'arrêter " peut être représentée par

<u>S'arrêter</u>	état initial =	V > 0, G > 0
	état final =	V = 0, G = 0
	but	= être à l'arrêt devant l'intersection
	préconditions	= le feu est à l'orange
	corps	= séquence : (Freiner, Rétrograder)

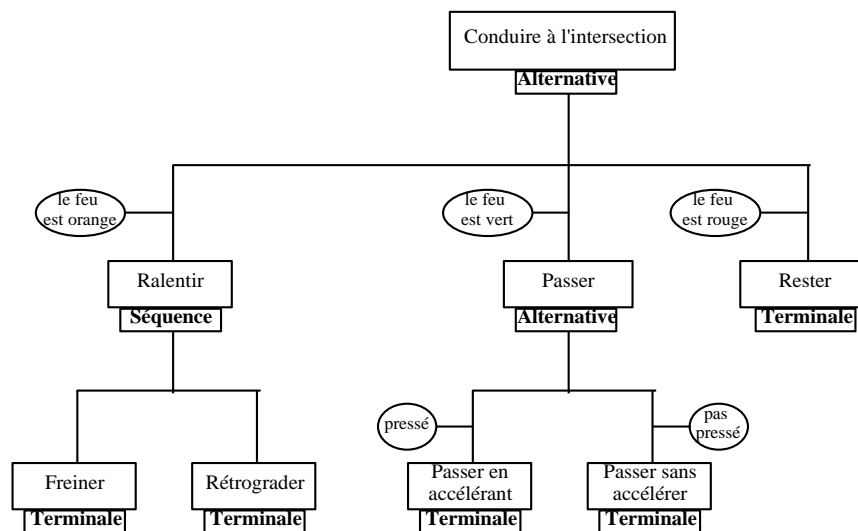


Figure 5.9. Description (partielle) d'une décomposition hiérarchique de tâche dans MAD

Conformément à ce modèle, le déroulement d'une tâche s'exécute en trois phases : la vérification de ses préconditions, la phase d'exécution du corps de la tâche puis la vérification des postconditions. Cependant, la méthode MAD ne fournit pas de modèle de traitement des tâches, celui-ci étant (partiellement seulement) implicite dans l'écriture de la décomposition hiérarchique. On peut par exemple sur la figure 5.9 se rendre compte du déroulement d'une stratégie de conduite d'un automobiliste à une intersection, conformément aux données sémantiques déjà traitées ci-dessus. La méthode MAD fournit donc un modèle de haut niveau d'abstraction pour les tâches cognitives. Elle permet une analyse " top-down " et modulaire qui fournit une décomposition hiérarchique décrivant clairement la stratégie mise en œuvre par une personne (l'opérateur) pour

effectuer une tâche ou pour résoudre un problème. Elle intègre un contrôle temporel de l'exécution des tâches, et réalise en cela une modélisation du traitement des données sémantiques d'un système de connaissances au même titre que GPS ou GOMS, les méthodes de résolution décrites dans MAD sont plus puissantes et plus flexibles que dans ces derniers. On peut remarquer cependant l'absence de mécanisme de décision lorsque sont rencontrées des alternatives (les préconditions ne sont pas suffisantes pour permettre la description de décisions complexes) et l'absence de la notion de plan, qui permet à un même niveau, d'établir un réseau de tâches connectées par différents types d'opérateurs "logico-temporels". Ce n'est pas le cas avec MAD et cela oblige parfois à créer des tâches intermédiaires qui n'ont pas toujours un sens d'un point de vue cognitif. Les interactions entre tâches (partage de ressources, flux de données etc.), ne sont pas non plus abordées dans le système MAD. MAD est un exemple typique des méthodes d'ergonomie qui permettent d'analyser et de décrire des tâches cognitives. C'est un point de départ très intéressant pour aborder la modélisation du traitement des connaissances, dans sa composante sémantique. En d'autres termes, c'est une approche possible de l'aspect fonctionnel (phénoménologique) du point de vue sémantique sur les systèmes de connaissances.

5.4. Le génie cognitif et la modélisation des tâches

5.4.1. Du niveau symbolique au niveau cognitif

Vers la fin des années 70, l'intelligence artificielle a connu un renouveau considérable grâce à la technique des *systèmes experts*. Ces systèmes sont de véritables systèmes de traitement de la connaissance puisqu'ils sont supposés simuler une expertise humaine dans un domaine donné. Mais pour cela, les techniques de type résolution de problèmes ont été abandonnées, car trop générales. Il n'est plus question, pour résoudre un problème précis d'utiliser des mécanismes "universels", mais au contraire des connaissances et des heuristiques tout à fait spécifiques au domaine. La technique utilisée consiste à construire, en liaison avec l'expert, une *base de connaissances* particulière, qui représente le savoir-faire en jeu. Cette base de connaissances est écrite à l'aide d'un langage de *représentation des connaissances*. La phase suivante consiste alors à exécuter cette base de connaissances grâce à un interpréteur du langage de représentation, qui est un programme qu'on appelle *moteur d'inférences*, qui déduit des réponses adéquates des données qui lui sont fournies. Sans rentrer dans les détails (on pourra consulter [Ermine 89] par exemple), notons que le langage de représentation permet en général de donner une formulation dite *symbolique* de la connaissance. L'archétype de ce genre de représentation est la formulation par des règles logiques, appelées souvent règles de production. Ces règles sont ensuite utilisées par un programme pour faire des déductions automatiquement (des inférences, d'où le nom de moteur d'inférences) à partir des données fournies et arriver à une conclusion qui permet de résoudre le problème posé.

Prenons l'exemple d'un système expert qui veut vérifier que le code de la route est respecté à une intersection, on peut écrire une base de connaissances sur le modèle de la figure 5.10. Cette base de connaissances est ensuite utilisée par un moteur d'inférences, pour déterminer si, dans un cas donné, le code est respecté. On voit dans la figure 5.11 une manière d'utiliser la base de connaissances dans cet objectif, qu'on appelle chaînage arrière qui simule un raisonnement régressif à partir d'un but. Sur cet exemple, on laisse le lecteur imaginer l'algorithme de raisonnement qu'utilise un tel système. Il est clair que si le nombre de règles est volumineux, si les données sont complexes (et notamment si elles comportent des variables), un tel système devient très difficile à programmer.

Outre la difficulté de programmer un moteur d'inférences efficace sur une base de connaissances volumineuse, une autre difficulté, beaucoup plus fondamentale, est apparue quand s'est développée la technologie des systèmes experts, qu'on a identifiée et nommée *goulet d'étranglement* dans cette approche. Sur un problème de grandeur réelle, il est apparu qu'il était la plupart du temps très difficile et très long, voire souvent impossible, de construire une base de connaissances satisfaisante avec un expert. Comme il est bien sûr impossible de se passer d'expert pour construire des systèmes experts (quoiqu'on ait bien essayé !), la faisabilité des systèmes experts a été fortement mise en doute. Une littérature abondante et de nombreuses méthodes palliatives ont été produites pour maîtriser ce phénomène, mais les résultats n'ont jamais été à la hauteur des espérances (parfois très exagérées, il faut le dire !).

Depuis, la réflexion a mûri et le problème n'est pas apparu comme un problème technique, mais conceptuel. Nous allons en faire ici une simplification très schématique, on pourra consulter par exemple l'excellent exposé [Ganascia 91] ou l'article original [Newell 82] pour plus de détails. La connaissance dans une base de connaissances de système expert est écrite sous une forme dite symbolique, qui est une représentation logique du problème. C'est ce qu'on appelle le *niveau symbolique* de la connaissance. Or, d'un point de vue psychologique, et contrairement à beaucoup de préceptes de l'éducation classique, ce n'est pas parce que l'on dispose d'une modélisation logique d'un problème qu'on en a nécessairement la compréhension ! En d'autres termes, décrire logiquement la solution d'un problème n'en donne pas une vision cognitive, c'est-à-dire

explicable et compréhensible. Le niveau symbolique n'est donc pas le plus haut niveau de description possible d'un système de connaissances, et n'apparaît dès lors plus que comme un niveau intermédiaire entre une représentation plus "cognitive" et la représentation exécutable par une machine (le programme informatique, par exemple). D'où l'hypothèse d'un niveau supérieur de représentation d'un système de connaissances, qu'on appelle *niveau cognitif* (knowledge level), qui est apte à accueillir des modèles pertinents à la fois pour les experts et les concepteurs de bases de connaissances (les *cogniticiens*), avec un passage possible (éventuellement automatique) à un modèle symbolique. Le niveau cognitif répond plus à un besoin de modélisation du système de connaissances, le niveau symbolique plus à une conception logique d'un système de traitement de ces connaissances : le niveau symbolique manipule des symboles et spécifie leur comportement (moteur d'inférences par exemple), le niveau cognitif est "situé immédiatement au-dessus du niveau symbolique, et est caractérisé par la connaissance comme médium et le principe de rationalité comme loi de comportement" [Newell 82], c'est-à-dire qu'il manipule des connaissances dans une seule perspective fonctionnelle (un rôle) : résoudre le problème qui lui est assigné. C'est donc bien le niveau qui est pertinent pour une description fonctionnelle du traitement de la connaissance dans son aspect sémantique.

```

SI Le feu est rouge
  ET L'accélération du véhicule est nulle
  ET Le conducteur s'arrête
ALORS
  ET L'accélération du véhicule est nulle
  ET La vitesse du véhicule est nulle

SI Le feu est rouge
  ET L'accélération du véhicule est négative
  ET Le conducteur s'arrête
ALORS
  ET L'accélération du véhicule est nulle
  ET La vitesse du véhicule est nulle

SI Le feu est rouge
  ET L'accélération du véhicule est positive
  ET Le conducteur pile
ALORS
  ET L'accélération du véhicule est nulle
  ET La vitesse du véhicule est nulle

SI Le feu est rouge
  ET L'accélération du véhicule est nulle
  ET La vitesse du véhicule est nulle
ALORS
  Le code de la route est respecté

Etc.

```

Figure 5.10. Base de connaissances sur le code de la route

Les travaux sur les systèmes experts, appellation qu'on a maintenant troquée plus favorablement contre *systèmes à base de connaissances*, se sont donc orientés vers le niveau cognitif. Comme il s'agissait de faire des systèmes informatiques industriels et opérationnels, il s'est créé un nouveau domaine de l'ingénierie qu'on a appelé naturellement *génie cognitif* (ou ingénierie des connaissances comme traduction directe de "Knowledge Engineering") [Vogel 89]. Le génie cognitif se fixe pour but d'offrir des outils pour modéliser au niveau cognitif un système de connaissances quelconque, notamment celui formé par les connaissances d'un expert sur un sujet précis. Il se trouve que le niveau cognitif, comme il a été dit, est orienté vers la résolution d'un problème donné, on retrouve donc des outils de modélisation de tâches de résolution de problèmes, qui, on va le voir, ressemblent singulièrement à ceux qui ont été décrits ci-dessus. Cependant, la connaissance est abordée d'un point de vue plus global. Non seulement les aspects de résolution de problèmes sont abordés, mais aussi la connaissance mise en œuvre pour cette résolution est modélisée à part entière. C'est ainsi que la plupart des méthodes de génie cognitif sont orientées sur deux axes : celui dit de la *connaissance statique*, qui modélise les objets et les concepts du domaine considéré et celui dit de la *connaissance dynamique* qui modélise les stratégies d'utilisation de cette connaissance statique destinées à résoudre un ou plusieurs problèmes déterminés. Pour illustrer ce paragraphe, nous allons donner deux exemples de méthodes de génie cognitif.

Utilisateur : Est-ce que : " Le code de la route est respecté " ?

Système : Est-ce que " Le feu est rouge " ?

Utilisateur : Oui

Système : Est-ce que “ L'accélération du véhicule est nulle ” ?
 Utilisateur : Non

Système : Est-ce que “ L'accélération du véhicule est positive ” ?
 Utilisateur : Oui

Système : Est-ce que “ Le conducteur s'arrête ” ?
 Utilisateur : Oui

Système : Conclusion : “ Le code de la route est respecté ”

Figure 5.11. Exemple de fonctionnement d'un système expert

5.4.2. La méthode KADS

La méthode KADS est sans doute la méthode de génie cognitif la plus connue ([Hickman 89], [Breuker 94]). Issue d'un projet européen dans la fin des années 80, elle avait pour but de réduire ce fameux goulet d'étranglement du transfert d'expertise dans la technologie des systèmes experts. Elle a pris l'approche du niveau cognitif, et fournit des outils de modélisation de la connaissance pour réaliser ce qu'elle appelle un *modèle d'expertise*. L'important développement de KADS a abouti à une méthode complète de gestion de projet industriel aux multiples aspects. on ne parlera ici que des aspects de modélisation qui nous intéressent. Le but du modèle d'expertise est de décrire la connaissance et la manière dont elle est utilisée dans une tâche particulière

Les catégories de connaissances

Le modèle d'expertise décrit une structure au niveau cognitif qui exprime les différents rôles des parties de la connaissance impliquées dans une tâche particulière. Ces rôles sont décrits dans trois catégories fondamentales de connaissances :

- Les *tâches* (“ Task Knowledge ”), qui décrivent une décomposition récursive d'une tâche au plus haut niveau en sous-tâches successives, qui spécifient ce que représente l'exécution de ces tâches, et qui décrivent quand les sous-tâches doivent être exécutées pour résoudre la tâche mère (c'est ce qu'on appelle le flot de contrôle). Le modèle de tâche utilisé dans KADS est similaire à ceux qu'on a décrit ci-dessus. Il comprend une partie définition qui décrit le “ quoi ” de la tâche et une partie corps qui décrit le “ comment ”. La figure 5.12 en donne un exemple.

Tâche : S'arrêter

Définition

But : amener la vitesse et l'accélération du véhicule à zéro
Entrées : V, G
Sorties : V, G

Corps

Type : composée
Sous-tâches : Freiner, Rétrograder
Rôles additionnels : Numéro de vitesse (de la première à la cinquième)
Structure de contrôle : Exécuter séquentiellement :
 Freiner(+V,+G,-V,-G),
 Rétrograder(+Numéro de vitesse, -Numéro de vitesse)

Tâche : Identifier le feu de circulation

Définition

But : Déterminer la couleur du feu de circulation
Entrées : Message
Sorties : Couleur

Corps

Type : composée
Sous-tâches : Récupérer le message, Interpréter le message
Structure de contrôle : Récupérer le message (+Message)
Si Message = 100
Alors Interpréter le message (-Couleur : Rouge)
Sinon
Si Message = 010
Alors Interpréter le message (-Couleur : Orange)
Sinon
Si Message = 001
Alors Interpréter le message (-Couleur : Vert)

Figure 5.12. Structure de tâche dans KADS

- La *connaissance du domaine* (“Domain Knowledge”) contient les faits et les hypothèses qui sont pertinents dans l’exécution d’une tâche dans le domaine d’application. La forme et la structure de ces éléments de connaissance sont définies dans ce que KADS appelle une *ontologie* qui fournit les primitives permettant de décrire la connaissance du domaine. Le plus souvent, il s’agit de modélisation de type objet ou réseau sémantique comme il en a été question au chapitre 2, § 2.4, et de propriétés relationnelles. La figure 5.13 en donne un exemple.

Concept : Feu de circulation

Propriétés :

Lieu géographique : {Chaîne de caractères} cardinalité : min 1; max 1;

Numéro : {1..40} cardinalité : min 1; max 1;

Type de lampe : {Type de lampe} cardinalité : min 1; max 3;

Positionnement = {angle du carrefour, suspendu au milieu de la chaussée,...}
cardinalité : min 1; max 1;

Concept : Type de lampe :

Couleur : {rouge, vert, orange}

Diamètre : {Entier cm}

Luminosité : {...}

Relation : Ensemble de feux de circulation disponibles pour un conducteur

“ L’ensemble des feux de circulation disposés à un carrefour utilisables par un conducteur donné ”

arguments :

feux de circulation

rôles : feux de circulation visibles par un conducteur donné,
ensemble de feux de circulation

cardinalité : min 1 ; max 3

conducteur

rôles : conducteur ayant une visibilité sur un ensemble de feux de circulation
conducteur

cardinalité : min 1 ; max 1

Figure 5.13. Représentation des connaissances du domaine dans KADS

Inférence Récupérer

Rôle d’entrée : signal

Rôle de sortie : signal codé => message

Rôle statique : critères de codage

Inférence Interpréter

Rôle d’entrée : signal codé => message

Rôle de sortie : signal interprété => couleur

Figure 5.14. Description des inférences Récupérer et Interpréter

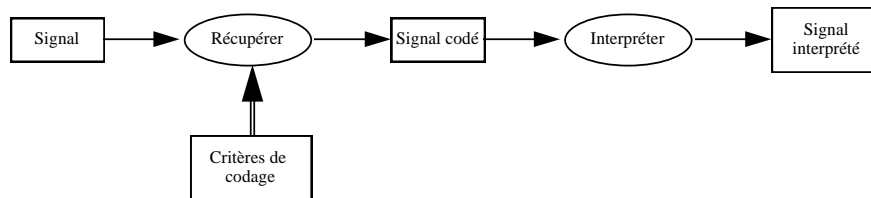


Figure 5.15. Structure d’inférence pour la tâche “ Identifier le feu de circulation ”

- Les *inférences* (“Inference Knowledge”) qui spécifient les pas élémentaires de raisonnement dans une application et les rôles qui font référence aux éléments de la connaissance du domaine manipulés par les inférences. Une inférence n’est pas nécessairement une tâche élémentaire, elle peut être complexe, mais en tant

que modélisation de la connaissance, sa description n'apporte rien au niveau cognitif. Les inférences sont décrites en relation dans une structure d'inférence qui exprime comment les éléments de connaissances, à travers les rôles qui leur sont attribués, sont utilisés et produits par elles. Un exemple est donné dans les figures 5.14 et 5.15: les tâches "Récupérer le message" et "Interpréter le message", sont réalisées par des inférences "Récupérer" et "Interpréter" et leur fonctionnement est décrit dans la structure d'inférences

La méta-connaissance

Les modèles de tâches, du domaine et des inférences sont nécessaires et suffisants pour établir un modèle d'expertise. Cependant, il est intéressant de dégager des structures générales, voire génériques, des modèles d'expertise, afin de mieux comprendre leur nature et leur fonctionnement et afin également de pouvoir réutiliser ces structures génériques sur d'autres cas. Ces structures sont appelées *méta-connaissances*. Dans KADS, on en distingue trois sortes :

- Les *ontologies*. Elles ont déjà été évoquées. Une ontologie spécifie une terminologie de référence attachée à la connaissance du domaine et ses différents constituants. Il peut y avoir plusieurs ontologies sur un seul domaine, chacune d'elles décrivant un point de vue particulier.

- Les *modèles de cas* ("Case Model Schemata"). Un modèle de cas décrit les éléments essentiels utilisés dans une tâche, ainsi que la structure globale de l'argumentation qui valide une solution.

- Les *méthodes de résolution de problèmes*. On retrouve ici l'idée de GPS. Celle-ci suppose qu'il peut exister des méta-modèles de résolutions de grandes classes de problèmes (on réduit ici l'ambition d'avoir un résolveur "général") qui peuvent s'instancier pour donner un modèle de tâches particulier sur un cas particulier.

"En résumé, la résolution de problème vue sous l'angle de la modélisation implique qu'un bon modèle d'expertise impose les bonnes structures sur le modèle du domaine (des ontologies), de telle façon qu'elles puissent être exploitées par une méthode de résolution de problème, pour remplir les éléments d'un modèle de cas qui puisse fournir une justification à la validité d'une conclusion" ([Van de Velde 94] § 2.5.2)

5.4.3. La représentation cognitive des connaissances dans la méthode MKSM

La méthode MOISE est une méthode de génie cognitif que nous avons initialisée vers 1989 [Ermine 93]. Elle a été conçue plus pour la recherche que pour une industrialisation directe, comme KADS. Elle a été utilisée depuis sur une trentaine de projets très divers, tant dans les domaines abordés que dans le degré d'utilisation. Au cours de ces applications, la méthode s'est affinée et précisée, certains aspects se sont développés, d'autres ont moins été étudiés (l'aspect vérification sémantique du langage de modélisation par exemple), des outils (non commercialisés) ont été développés pour sa mise en œuvre. Cette méthode, contemporaine des grandes méthodes dans ce domaine, est basée sur les mêmes principes que ces dernières, notamment sur l'hypothèse du niveau cognitif. Elle comporte une phase qui consiste à construire un modèle formalisé de l'ensemble des connaissances qui interviennent dans le problème qui est traité. C'est une étape de modélisation, au même sens que la construction du modèle d'expertise de la méthode KADS. C'est cette phase que nous allons décrire ici, en reprenant la structure d'exposition de KADS. Actuellement, MOISE, et notamment le langage de modélisation, est intégrée à une méthodologie générale de gestion des connaissances, la méthode MKSM, dont la problématique dépasse et englobe celle du génie cognitif (cf. le dernier chapitre de la deuxième édition de cet ouvrage). Les modélisations décrites ci-dessous constituent la représentation cognitive des connaissances dans MKSM.

Les catégories de connaissances

Le langage de modélisation cognitive des connaissances de MKSM comporte deux composantes nécessaires et suffisantes pour construire un modèle cognitif. Ces composantes forment la description de la connaissance (la couche descriptive du langage). Ce langage peut s'exprimer sous forme graphique (grapho-langage) ou formellement (spécifications formelles). Il possède également une sémantique (dite dénotationnelle) qui en donne une base mathématique.

- La *connaissance statique*. C'est la connaissance du domaine. Sa modélisation est réalisée aussi indépendamment que possible de l'utilisation qui en est faite. Ce point ne peut être complètement réalisé, puisque la connaissance statique n'est pas une connaissance en soi, mais un des deux points de vue descriptifs de la méthode sur un système de connaissances. Il ne peut donc en être séparé totalement et reflète nécessairement la

finalité de ce système. La connaissance statique spécifie la connaissance en termes d'objets et les relie entre eux par des liens fortement sémantisés grâce à l'utilisation des réseaux sémantiques. Les principaux liens utilisés sont les liens de définition (le lien att, pour attribut) et les liens classificatoires (le lien spec, pour spécialisation). D'autres liens sont des facettes qui spécifient des cardinalités ou des propriétés relationnelles. Un exemple est fourni dans la figure 5.16. Le langage formel est strictement équivalent au langage graphique dans ce cas.

- La *connaissance dynamique*. C'est une représentation de la stratégie mise en œuvre pour résoudre le ou les problèmes qui sont posés dans le système de connaissances considéré. La connaissance dynamique est vue sous deux angles. Le premier est celui de la résolution de problèmes, dans la lignée du GPS. Il ne s'agit pas cependant de modéliser la résolution générale de problèmes, mais un seul ou un petit nombre de problèmes donnés et identifiés. L'aspect résolution de problème de la connaissance dynamique se résume à deux questions: "quel type de tâche doit-on résoudre ?" et "comment résout-on généralement ce type de tâche ?". Le deuxième aspect de la connaissance dynamique est celui de la manipulation de la connaissance statique. On a construit, grâce aux modèles de la connaissance statique, une représentation des objets du domaine en faisant peu référence à leur utilisation. La question se pose maintenant "comment utiliser cette connaissance statique pour résoudre le ou les problèmes posés ?". C'est une approche distincte du premier aspect, mais tout à fait complémentaire, qui permet de guider le travail d'élaboration des modèles de connaissance dynamique à travers la connaissance statique (il est à noter que ces approches ont été souvent antagonistes, ce qui est regrettable - cf.. infra).

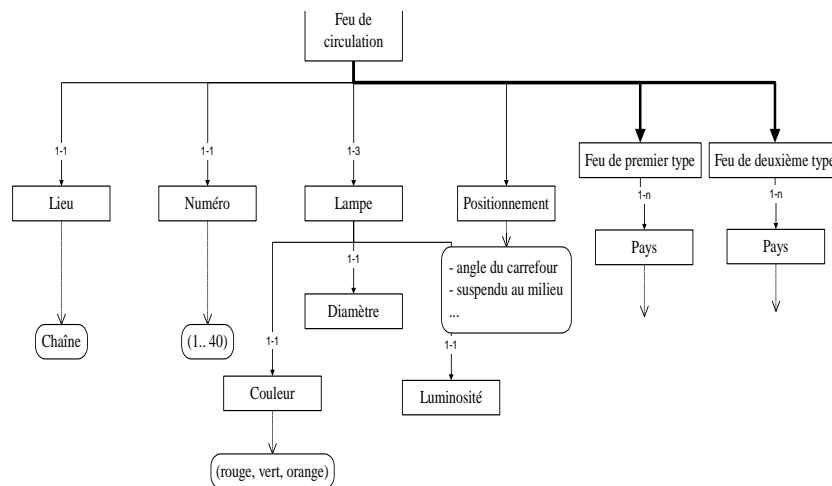


Figure 5.16. Spécification graphique du réseau décrivant le concept " Feu de circulation " dans le langage de modélisation cognitive de MOISE / MKSM

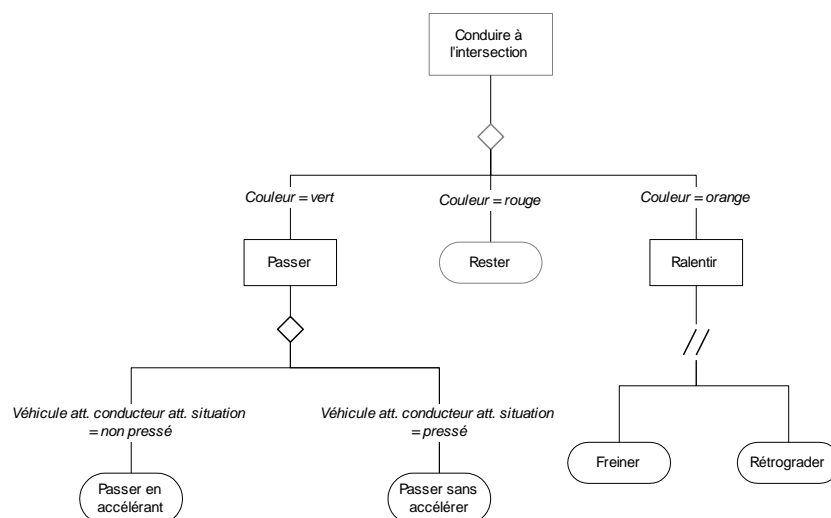


Figure 5.17. Représentation graphique du flot de contrôle de la connaissance dynamique dans MOISE / MKSM

Le langage de MKSM pour construire un modèle de la connaissance dynamique est un langage de tâches similaire au langage MAD exposé au § 5.3.3. Il comporte la description de l'ordonnement des tâches à accomplir par une décomposition hiérarchisée, arborescente qui raffine récursivement les tâches de plus haut niveau en sous-tâches plus détaillées, jusqu'à aboutir à des tâches qu'on considère comme terminales. Chaque tâche qui se décompose possède un *type* qui décrit le contrôle qu'elle exerce sur l'exécution de l'ensemble de ses sous-tâches. Ainsi, une tâche séquentielle exécutera successivement chacune de ses sous-tâches dans l'ordre donné, une tâche alternative exécutera la sous-tâche dont la condition d'application est vérifiée, une tâche parallèle exécutera ses sous-tâches en parallèle, une tâche répétitive exécutera une même sous-tâche successivement avec des paramètres différents etc. L'arbre de décomposition des tâches en sous-tâches, avec leurs types s'appelle, pour cette raison, le *flot de contrôle* de la connaissance dynamique. Ce flot de contrôle est caractéristique de la stratégie de résolution de problème et peut être représenté graphiquement à la manière du langage MAD (figure 5.17). Par ailleurs, les tâches manipulent la connaissance statique, elles échangent donc des données qui proviennent des réseaux sémantiques élaborés précédemment. Cet échange de données constitue le *flot de données* (sémantiques) de la connaissance dynamique. Pour des raisons de lisibilité, ce flot de données ne peut être représenté graphiquement, il est représenté seulement dans le langage formel (Figure 5.18).

```

tâche : Conduire
type : alternative
paramètres entrée : (Vinitiale : vitesse, Ainitiale : accélération)
paramètres sortie : (Vfinale : vitesse,
                    Afinale : accélération,
                    Nvitesse : n° de vitesse)
sous-tâches : (Passer avec-condition Feu de circulation att lampe att couleur = vert;
                Ralentir avec-condition Feu de circulation att lampe att couleur = orange;
                Rester avec-condition Feu de circulation att lampe att couleur = rouge)
flot {   Conduire.*initiale (Passer.*initiale;
                    Ralentir.*initiale;
                    Rester.*initiale
                Passer.*finale;
                Ralentir.*finale;
                Rester.*finale (Conduire.*finale
                Ralentir.Nvitesse (Conduire.Nvitesse)

tâche : Rétrograder
type : terminale
paramètres entrée : (NvitesseInitiale : n° de vitesse)
paramètres sortie : (Nvitesse : n° de vitesse)
flot {   Rétrograder.Nvitesse (Ralentir.Nvitesse)           etc.

```

Figure 5.18. Représentation formelle (incluant le flot de données) de la connaissance dynamique dans MOISE / MKSM

La méta-connaissance

La méta-connaissance se définit comme une “ connaissance sur la connaissance ”, initialisant une boucle récursive pouvant définir de nombreux niveaux de méta-connaissance. Dans MOISE, on distingue deux composantes de méta-connaissances (ces notions n’ont pas été reprises dans MKSM) :

- La *composante générique*, qui décrit les fonctions qui contrôlent (au sens anglo-saxon de “ faire fonctionner ”) les connaissances statiques et dynamiques. Pour cela, on utilise les structures abstraites (ou génériques, puisqu’elles ne dépendent pas d’un contenu spécifique) de ce type de connaissances : langage de description de réseaux ou de tâches. Cette composante contient donc essentiellement des gestionnaires de réseaux sémantiques et des gestionnaires de tâches qui expriment des propriétés générales des structures de connaissance utilisées. Elle est indispensable si l’on veut que les modèles de connaissance élaborés soient “ exécutables ”, c’est-à-dire si on veut les faire fonctionner, notamment en simulation. La composante générique permet de décrire des mécanismes bien connus dits d’héritage, où certaines propriétés des concepts sont transmises automatiquement à d’autres objets. Voici par exemple certaines règles d’héritage.

```

Règle d’héritage N°1 :
Si Concept att Attribut = Objet1
et Objet2 spec Objet1
Alors Concept att Attribut = Objet2

```

Donnons un exemple d'application de cette règle : Conducteur **att** Propriété = Voiture, Véhicule **spec** Voiture, donc Conducteur **att** Propriété = Véhicule, autrement dit un conducteur qui possède une voiture possède aussi un véhicule, puisque une voiture est une sorte de véhicule

Règle d'héritage N°2 :
Si Concept1 **att** Attribut
et Concept1 **spec** Concept2
Alors Concept2 **att** Attribut

Par exemple : Véhicule **att** Vitesse, Véhicule **spec** Voiture, alors Voiture **att** Vitesse, autrement dit un véhicule est caractérisé par sa vitesse, donc une voiture aussi, puisque une voiture est une sorte de véhicule, et ainsi de suite...

La composante générique permet également de décrire comment se déroule l'exécution d'une tâche, par exemple, une tâche alternative, une fois déclenchée, déclenche une de ses sous-tâches dès que sa condition de déclenchement est vérifiée, ceci peut s'écrire formellement par exemple de la façon suivante :

Si T est une tâche alternative
et T est déclenchée
et ST est une sous-tâche de T
et une condition de déclenchement de ST est C
et C est vérifiée
Alors ST est déclenchée

Une dizaine de règles du style de celle ci-dessus est suffisante pour décrire complètement le fonctionnement des différents types de tâches. Ces règles sont d'ailleurs aisément programmables sur un ordinateur, fournissant ainsi un moteur de tâches capable de faire de la simulation à partir des modèles de connaissances qui ont été décrits sous forme de tâches. On pourra faire le parallèle avec la stratégie générale de GPS (Figure 5.4) ou le modèle de gestion des tâches dans GOMS (Figure 5.8).

- La *composante sémantique*, permet de décrire des contraintes sémantiques sur la connaissance afin d'en assurer un certain type de cohérence. Cette composante est actuellement la moins développée dans MOISE, mais sans doute aussi une des plus délicates à mettre en œuvre. Elle utilise les résultats de la théorie sémiotique évoquée au chapitre 2, § 2.3, et des expressions de contraintes sémantiques issues d'une théorie formelle qui définit la sémantique mathématique du langage. Il n'est pas dans notre propos d'aborder ici un tel sujet.

5.5. Le traitement des données sémantiques : mythes et limites

5.5.1. L'antagonisme connaissance statique/connaissance dynamique

L'aspect fonctionnel de la composante sémantique d'un système de connaissances, tel qu'il été étudié ici, est un ensemble de variations autour de la modélisation de tâches cognitives pour la résolution de problèmes. Il a été souvent séparé de (voire même opposé à) son aspect structurel, évoqué au chapitre 2, comme génération et organisation de la mémoire sémantique. "Quoique, en résolution de problème, une grande attention ait été prêtée à la représentation et à la transmission des connaissances, l'une et l'autre n'y ont jamais été entendues que comme le reflet de la structure logique du raisonnement [...]. Tout ce qui fait référence à l'organisation interne de la mémoire est ignoré" ([Ganascia 90] Chap. 4, § 4.3). Dans la vision systémique qu'on essaie de défendre ici, c'est une erreur qui paraît grossière : connaissance statique et dynamique sont deux points de vue distincts, mais non indépendants, d'un même système de connaissances. Il existe donc nécessairement une forte corrélation entre ces deux parties, et il est nécessaire de l'explicitier. Ce n'est que dans certaines méthodes de génie cognitif (pas toutes cependant) que ce point de vue commence à être abordé. On l'a vu ci-dessus avec la notion de rôle dans KADS ou de flot de données dans MKSM. Beaucoup d'approches établissent une dichotomie entre les connaissances statiques (parfois nommées connaissances déclaratives) et les connaissances dynamiques (savoir-faire, procédures...). La psychologie cognitive ne reconnaît pas cette dichotomie, qu'elle juge fortement non pertinente. Elle affirme même souvent que la connaissance statique est asservie à la connaissance dynamique, selon l'adage "Les objets sont structurés suivant l'action", base de la théorie de l'apprentissage par l'action⁵⁵. Ainsi, les méthodes de modélisation des connaissances statiques et dynamiques peuvent varier selon l'optique retenue, mais il y a toujours une interaction fondamentale entre ces deux types de savoir.

⁵⁵ C'est en fait une vieille tradition qui postule que "la connaissance vient de l'action", de Heidegger et Husserl en passant par le béhaviorisme ("learning by doing"), jusqu'à Piaget et l'école psychologique russe.

5.5.2. Les limites de la formalisation des connaissances

Le traitement des données sémantiques a été vu ici du point de vue de l'intelligence artificielle ou de la psychologie cognitive. Cette vision tourne autour de la modélisation et de la formalisation de mécanismes cognitifs. Orientée soit vers la création de systèmes informatisés (génie cognitif, planification...) soit vers la conception d'interfaces homme/machine (ergonomie cognitive), les méthodes qui ont été vues ici aboutissent à des résultats formels, voire abstraits. Ceci pose plusieurs questions.

La première question est bien évidemment celle de la validité des ces formalisations en tant que représentation des connaissances. On peut effectivement s'interroger, en voyant les modèles abstraits décrits ci-dessus (et encore, les exemples choisis sont parmi les plus lisibles !), et se demander si on ne s'éloigne pas de la connaissance humaine proprement dite. La question, même si elle est justifiée, est ambiguë. On ne se pose pas en effet cette question (?) à propos d'un système d'équations différentielles modélisant un phénomène naturel. Il s'agit en fait de savoir quels buts sont recherchés dans ces abstractions, la représentation des phénomènes de traitement de la signification n'étant pas un but en soi. Dans notre cas, la réponse est double.

D'abord, il s'agit de capter des connaissances, des savoir faire, dans un langage autre que celui des personnes qui les détiennent. C'est donc un instrument de communication (ce qui pourrait paraître évident pour un langage !) de connaissances. Comme ce langage préexiste à la modélisation des connaissances, le valider dans ce sens consiste donc à vérifier auprès de détenteurs de savoir qu'il leur permet bien de transmettre ce dernier. Un biais bien connu par nous autres expérimentateurs apparaît alors. Le modèle (re)construit avec les détenteurs du savoir renvoie à ceux-ci une image formelle d'une partie d'eux mêmes qui les fascine souvent au point de les tromper. C'est la vertu (ou le défaut) des abstractions que de mettre en œuvre des mécanismes qui peuvent fonctionner hors contexte avec une rigueur toute mathématique. Si bien qu'il est très aisé de reconnaître comme valides des éléments, non pas pour leur contenu réel, mais pour leur forme structurée et cohérente. Il y a un glissement progressif du fond vers la forme qui est très sensible dans ce domaine, du fait qu'on travaille sur du matériau profondément humain (la connaissance, le sens) avec des outils très formels. En caricaturant, on peut dire, par exemple, qu'un expert est prêt sincèrement à valider n'importe quel modèle formalisé de sa propre connaissance, pourvu qu'il soit bien structuré, parce que ce modèle lui renvoie une image organisée dont il n'avait jamais pris conscience auparavant (et pour cause puisqu'il s'agit en fait d'une reconstruction ad hoc !). Ce n'est que plus tard, après éventuellement maintes expérimentations qu'on peut s'apercevoir que ce modèle n'est pas si valide que ça. Dans un second temps, il faut voir que les méthodes décrites ci dessus visent toutes un but opérationnel, qui est la plupart du temps la réalisation d'un système automatisé. La validation dans ce sens est donc fournie par la qualité du système conçu à partir de ces méthodes. Pour les systèmes à base de connaissances, comme il a été dit par exemple au § 5.4, l'approche au niveau cognitif (knowledge level) a fortement réduit le fameux "goulet d'étranglement" qui faisait barrage à l'essor des technologies de la connaissance. Dans ce sens, on peut donc justifier les modèles introduits. Mais ce type d'approche est équivalente à celle de la simulation, qui ne justifie pas la pertinence du modèle utilisé, mais son caractère opératoire.

En fait, la formalisation des connaissances telle que nous l'avons vue dans ce chapitre prend sa justification dans la psychologie cognitive. Mais elle est constamment tiraillée entre ces deux aspects : la communication des connaissances qui pousse à utiliser des langages de plus en plus conceptuels (pour ne pas dire contextuels), et "l'opérationnalisation" des connaissances qui pousse à formaliser de plus en plus abstraitement les langages de description. Ses limites oscillent sans cesse entre ces deux pôles complémentaires, sinon contradictoires.

Chapitre 6

Connaissance et contexte

Aspects fonctionnels

6.1. Introduction

Tout système est un objet actif qui est doté d'au moins un projet identifiable, ceci est un axiome fondamental de la systémique. Il en est ainsi des systèmes de connaissances. En dehors donc des aspects "traitement de l'information" et des aspects "résolution de problème" qui ont été évoqués aux chapitres précédents, il convient de décrire l'activité contextuelle de tels systèmes, qui rend compte de leur aspect fonctionnel propre. Cette description a pour objet de situer le système en tant qu'organe ouvert sur l'environnement et échangeant avec lui. Ainsi, l'aspect fonctionnel du contexte d'un système de connaissances se décline autour du concept de "boîte noire". La boîte noire se définit comme un processus, à partir de ses échanges avec son environnement, sans référence à son fonctionnement interne, qui reste inconnu à l'observateur, à moins qu'on le raffine à l'aide d'un autre ensemble de boîtes noires. La richesse de la description tient à la description de ces flux échangés et aux interconnexions que ceux-ci réalisent entre les boîtes noires, ainsi qu'à la finesse des décompositions et raffinements successifs qu'on peut effectuer dans la modélisation.

Cette technique de modélisation est bien connue dans les industries et les diverses ingénieries, elle est à notre connaissance, peu répandue dans d'autres disciplines telles que les sciences humaines ou les sciences fondamentales. Elle relève de ce qu'on appelle "l'analyse fonctionnelle" ou "l'analyse système" (pour ne pas dire systémique). De telles méthodes sont des outils de description et de codification qui visent à étudier le fonctionnement de systèmes complexes, afin d'en maîtriser les phénomènes techniques, sociaux, économiques etc. Leur simplicité apparente, et leur facilité d'accès (la méthode SADT dont il est question plus bas est présentée comme "un langage pour communiquer les idées" [Ross 77]), en font des instruments qui permettent une rapide appréhension des systèmes en contexte, du point de vue des processus, des activités, qui s'y déroulent. Nous en citerons ici quelques exemples significatifs.

6.2. IDEF0 et SADT

Le programme IDEF (Integrated DEFinition language, provenant de ICAM -Integrated Computer Aided Manufacturing- Definition Language créé par l'US Air Force) vise à fédérer un ensemble de méthodes permettant de décrire des processus (industriels) de complexité diverses. Ces méthodes utilisent des langages qui comportent des schémas et des textes. En 1994, l'environnement intégré IDEF est constitué de 14 méthodes (5 existantes et 9 proposées) [Sandoval 1994]. La première, IDEF0, est inspirée directement du langage graphique SADT (Structured Analysis and Design Technique), qui est une marque déposée. IDEF0 et SADT s'appliquent d'abord à l'analyse fonctionnelle de systèmes importants et complexes, et convient donc bien à notre propos. C'est une méthode d'analyse et de conception qui fournit des outils pour communiquer les résultats de l'analyse et de la conception dans une notation claire et précise, pour contrôler l'exactitude, la cohérence et la qualité de manière continue et systématique, pour documenter le déroulement, les décisions et les résultats de l'analyse et de la conception. IDEF0, comme SADT, "se présente comme un ensemble cohérent de méthodes et de règles constituant une démarche disciplinée d'analyse et de conception, construite sur un ensemble de concepts étroitement liés entre eux" [IGL 82]. C'est une technique de modélisation de l'activité, pour l'analyse détaillée des processus.

SADT attaque un problème en en construisant un (ou éventuellement plusieurs) modèle dans le but d'en exprimer une compréhension en profondeur. L'analyse de tout problème est descendante, hiérarchique, modulaire et structurée. La modélisation fonctionnelle décrit le processus en termes d'entrées, sorties, contrôles et mécanismes. Les *entrées* sont les flux utilisés par la fonction, elles peuvent être constituées de matière, d'information etc., les *sorties* sont les résultats fournis, ce sont également des flux. Les *contrôles* sont les contraintes ou les commandes qui précisent comment se déroule la fonction. Les *mécanismes* sont les ressources utilisées par la fonction. Graphiquement, la fonction est représentée par une cellule (un rectangle symbolisant la boîte noire), et les autres éléments (appelés interfaces) sont représentés par des flèches (Figure 6.1).

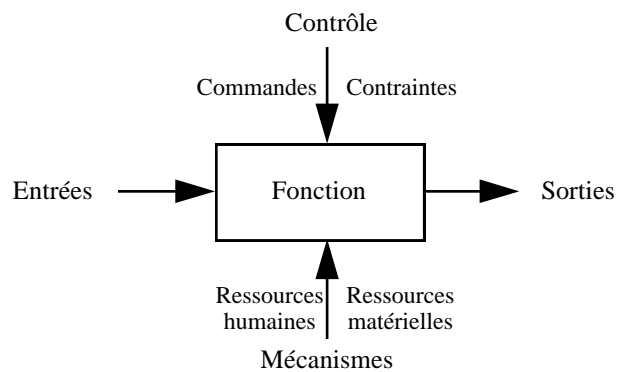


Figure 6.1. Diagramme représentant une fonction

Les différentes boîtes peuvent être connectées par leurs interfaces, les entrées d'une fonction pouvant être les sorties d'une autre fonction et ainsi de suite. On peut ainsi décrire une succession de fonctions, succession qui est souvent, mais pas nécessairement temporelle, et qui décrit une activité. L'exemple des feux de circulation est donné dans la figure 6.2.

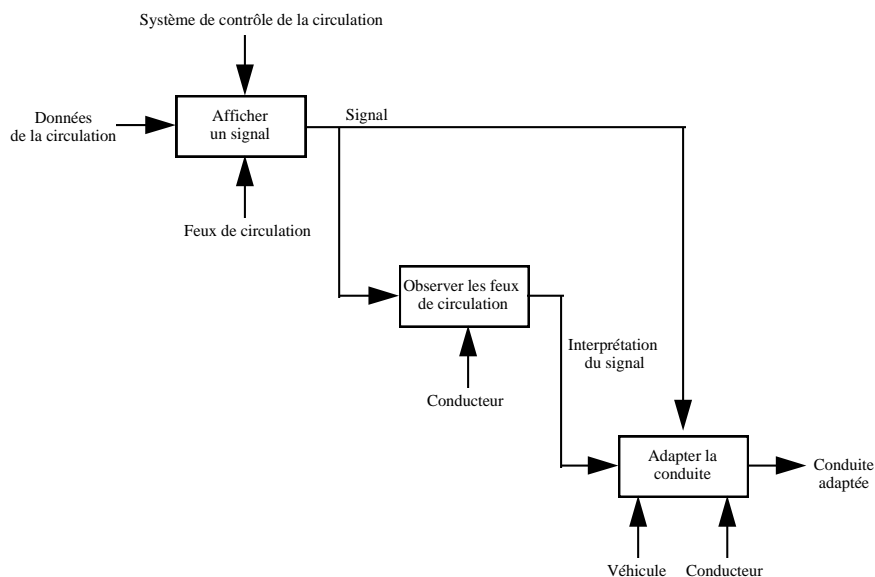


Figure 6.2. Diagramme de l'activité de conduite à une intersection

Une des autres importantes caractéristiques d'un langage tel que SADT est de fournir une description hiérarchisée des activités. En effet, un diagramme tel que celui de la figure 6.2 ne peut contenir beaucoup de boîtes interconnectées, sous peine de devenir vite illisible. Aussi peut-on décomposer une fonction en un autre diagramme, et obtenir ainsi, des niveaux différents de modélisation d'une activité par raffinements successifs, comme le montre la figure 6.3.

Pour reprendre l'exemple de la figure 6.2, si l'on cherche à décomposer la fonction "Afficher un signal", on peut obtenir par exemple le diagramme de la figure 6.4. On peut voir sur ce diagramme que la fonction "Déterminer l'axe le plus chargé" pourrait encore se décomposer en de nombreux niveaux hiérarchiques, jusqu'à spécifier complètement un programme informatique qui déterminerait, à partir de données captées sur le terrain, quel axe de circulation est le plus encombré.

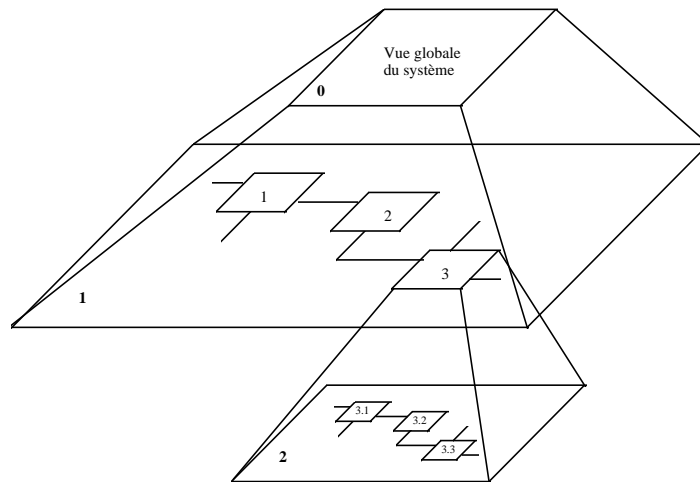


Figure 6.3. Décomposition hiérarchique d'une activité

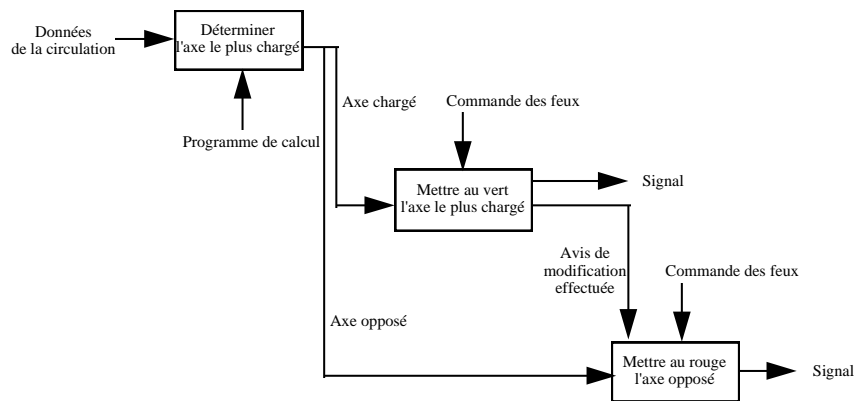


Figure 6.4. Décomposition de la fonction "Afficher un signal"

IDEFO et SADT sont des méthodes typiques de l'analyse descendante, qui part des fonctions les plus générales du système pour les décomposer en des sous fonctions de plus en plus détaillées, jusqu'à ce qu'on ait une information "suffisante" pour décrire l'activité du système qu'on considère. Cette description peut donc être grossière aussi bien qu'extrêmement détaillée. Elle n'exprime cependant qu'une vision globale de l'activité, en rapport avec son contexte, car elle ne permet pas la maîtrise d'un objectif précis, et ne prend pas en compte des éléments de nature plus "cognitives" des activités, comme le contrôle sur les enchaînements de fonctions, ou la prise en compte du temps. La hiérarchie peut également poser des problèmes de maîtrise des points de vue entre différents niveaux du modèle. Notons que SADT comporte une vision duale des diagrammes d'activités (qu'on appelle des actigrammes), qui sont les diagrammes de données (datagrammes) dans lesquels les rectangles représentent cette fois-ci des données et les flèches représentent les activités qui créent ou utilisent ces données. Le formalisme des datagrammes est assez peu utilisé dans la pratique.

6.3. L'analyse fonctionnelle

Bien que le terme "analyse fonctionnelle" est d'une compréhension très large (c'est quasiment l'objet de ce chapitre), il possède un sens précis et restreint dans beaucoup de milieux industriels de production. Dans les processus de production actuels, la réduction des coûts est un objectif fondamental. Initialisée dans les Etats-Unis d'après guerre, une méthode, orientée vers ce but, s'est propagée et est actuellement appliquée à très large échelle dans le monde, il s'agit de "l'Analyse de la Valeur". L'idée de cette approche tient à la prise en compte, dès la conception d'un produit, de la réduction des coûts, tout en gardant un produit de qualité. "Le produit optimal sera celui qui remplira toutes les fonctions nécessaires à l'exclusion de toute autre, et ce en utilisant les solutions techniques les plus simples et les moins onéreuses" ([Lachnitt 80]). La notion centrale de cette

approche est donc la notion de fonction, liée à la notion d'activité, de service à rendre, de besoin à satisfaire. Elle est définie comme les "actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées exclusivement en terme de finalité" (norme X 50-150). Il s'agit donc bien d'une activité en tant qu'interaction avec le contexte (utilisateur, milieu...).

On s'est vite aperçu que la recherche intuitive des fonctions d'un produit ne permettait d'en trouver qu'un nombre insuffisant, de l'ordre 50 à 60 %, ce qui aboutit donc à des produits peu satisfaisants. On a ainsi mis en place des méthodes pratiques et systématiques dites d'analyse fonctionnelle, permettant de découvrir, pour un produit donné, l'ensemble des fonctions nécessaires et suffisantes à sa conception et réalisation en qualité. Il s'agit donc ici de produits manufacturés, d'artefacts physiques et non de systèmes, et a fortiori pas de systèmes de connaissances. Cependant, la problématique est similaire, et a influencé de nombreuses autres méthodes d'analyse. Elle a été notamment étendue aux organisations, donc à des systèmes humains complexes, sans presque aucune modification (Analyse de la valeur administrative), elle est donc source d'inspiration pour la modélisation fonctionnelle des systèmes. Les méthodes d'analyse fonctionnelle sont en général plus un support de réflexion méthodologique et systématique que des études sophistiquées sur les systèmes conçus ou à concevoir. Nous allons en évoquer quelques unes ici pour en donner une idée [Tassinari 92].

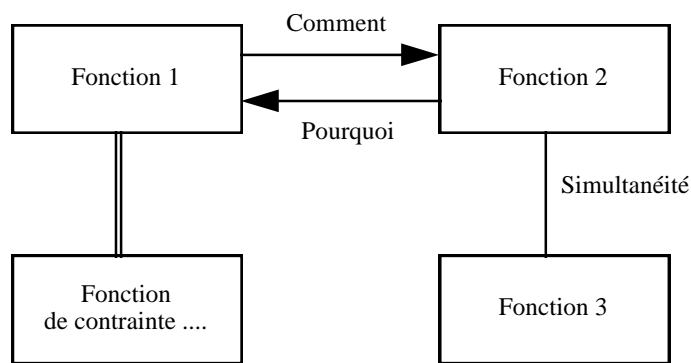


Figure 6.5. Principe du diagramme FAST

La méthode FAST (Functional Analysis System Technique) consiste à représenter l'ensemble des fonctions identifiées dans le système et leurs dépendances dans l'ordre d'importance. Dans un diagramme, on dispose les fonctions de gauche à droite en commençant par les fonctions principales. On fait ainsi apparaître le chemin critique qui mène d'une fonction principale aux différentes fonctions secondaires qui en découlent. Les liens de gauche à droite entre les fonctions répondent à la sémantique du "comment", les liens inverses à la sémantique du "pourquoi", on dispose également à la verticale de certaines fonctions, celles qui s'exécutent simultanément (sémantique du "quand"). De plus, on dispose en dehors du chemin critique les fonctions d'esthétique ou les fonctions de contrainte ou autres qui ne répondent pas aux trois questions (figure 6.5).

La figure 6.6 montre une ébauche très simplifiée de l'analyse FAST d'un système de feux de circulation.

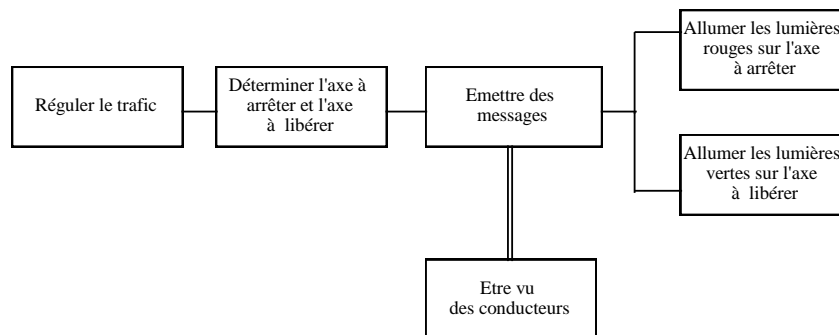


Figure 6.6. Diagramme FAST pour les feux de circulation

La méthode SAFE (Sequential Analysis of Functional Elements) est une méthode qui a pour but de rechercher les fonctions d'un produit à travers l'étude des séquences de son cycle de vie. L'analyse des séquences consiste à identifier toutes les opérations qui ont un rapport direct avec le fonctionnement du système, et pour chacune d'elles à rechercher les fonctions qui s'y rapportent. "En d'autres termes, il s'agit de se mettre à la place de l'utilisateur, de tenir compte de l'environnement au moment où il utilise le produit et de rechercher quelles sont les fonctions à remplir durant cette période" [Tassinari 92]. Si par exemple, on considère une intersection routière, on considère que l'utilisateur est le conducteur et les feux, l'environnement du carrefour, le véhicule, doivent remplir des fonctions afin de réguler sa conduite, on trace le graphe des séquences (un "scénario") de la conduite d'un automobiliste à un carrefour, et on recherche les fonctions qui se rapportent à chacune d'elles (Figure 6.7).

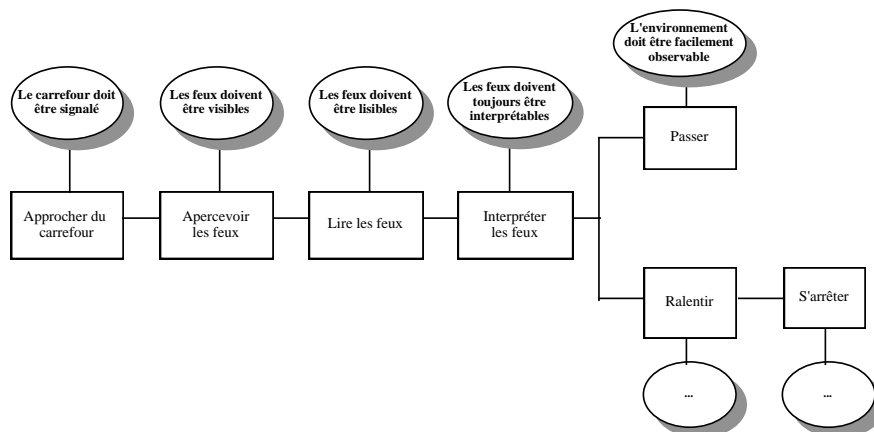


Figure 6.7. Diagramme SAFE pour les séquences de la conduite à un carrefour

La méthode ARFON (Analyse et Recherche FONctionnelle) consiste à étudier l'environnement et le contexte d'utilisation et à associer les fonctions que ce contexte impose au produit (cf. [Lachnitt 80]). Elle part du principe que le produit établit des relations avec les différents éléments de son contexte : êtres humains (utilisateurs, opérateurs...), éléments matériels (objets environnants), milieu ambiant (conditions climatiques, conditions d'utilisation...), normes et réglementations. Comme dans la méthode précédente, on recherche tous les états du cycle d'utilisation du produit. Chaque échange avec un élément extérieur se décrit par une relation qui peut se matérialiser par un tableau tel que celui de la figure 6.8, décrivant quelques caractéristiques fonctionnelles d'un feu de circulation.

Milieu Extérieur		Relations fonctionnelles	
Éléments	Caractéristiques	Désignation	Caractéristiques
Conducteur	Regarde	Etre visible	Disposition adéquate Diamètre et luminosité suffisantes
Conducteur	Interprète	Etre interprétable	Configuration de panne interprétable (orange clignotant)
Soleil	Se réfléchit sur les surfaces lisses	Etre protégé des réflexions du soleil	Pare-soleil Verres dépolis
Brouillard	Masque	Etre visible dans le brouillard	Luminosité suffisante
Alimentation électrique	220V, normalisé	Etre raccordé à l'alimentation électrique	Dispositifs de raccordement

Figure 6.8. Eléments d'analyse fonctionnelle pour un feu de circulation

Cette dernière méthode est tout à fait caractéristique d'une étude de contexte, car elle définit l'objet en fonction de ses interactions avec son environnement. L'objet n'existe donc que par ses échanges avec son entourage, que ce soit des acteurs actifs du système global (par exemple ici les conducteurs), ou des éléments qui interviennent de manière « indirecte » (par exemple ici les éléments climatiques).

La méthode ARFON a d'ailleurs été prolongée par la méthode ARCOL (Analyse et Recherche d'une Conception Logique) permettant de modéliser un produit afin d'optimiser ses fonctionnalités. Elle s'inspire très directement des concepts de base de la systémique, puisqu'elle modélise le système à partir de « composants » qui sont des processeurs de flux qui sont échangés avec l'environnement ou entre les composants eux-mêmes. Les composants sont classés en composant de transformation, de transmission, de communication avec l'environnement, et sont ainsi estimés selon des valeurs plus ou moins importantes ou fondamentales, permettant de réenvisager leur existence ou leur reconception. « Le moyen d'expression est un graphique où des rectangles représentent ces composants, et des traits de liaison entre ces rectangles les flux. Ce graphique sert ensuite de base à la simplification du produit, en recherchant les circuits de flux évitant de passer par les éléments de construction les plus coûteux » ([Lachnitt 80] Chap. 3).

6.4. L'analyse modulaire des systèmes

L'analyse modulaire des systèmes (AMS) est « une méthode efficace pour appliquer la théorie des systèmes au management » [Mélèse 72]. C'est en fait une méthode utilisant le langage des systèmes pour décrire et formuler les processus de l'entreprise, vus comme un ensemble très complexe d'échanges et de relations. Ce langage n'est pas purement fonctionnel, il reflète la dualité systématique entre des modules structurels auxquels on attribue des fonctions, et des chaînes de pilotage qui programment l'activité des divers modules. L'objectif d'une telle méthode est de comprendre l'activité d'un système (une entreprise, une organisation...), afin de mieux agir dessus. Dans l'optique de description d'activités en contexte, c'est l'aspect langage de description qui est significatif pour nous. Pour l'aspect management, on pourra consulter l'ouvrage de Jacques Mélèse cité. L'AMS est très orienté vers la modélisation d'entreprise manufacturière, d'organisation. Elle est moins adaptée à la description générale de système. Pour garder la continuité de notre propos, nous allons l'appliquer aux systèmes de feux de circulation, ce qui pourra paraître inadaptable sur certains aspects.

Le premier élément de base de l'AMS est le *module technologique* qui effectue des transformations sur les flux d'entrées-sorties correspondant aux missions du système. Il est représenté par une boîte noire, traversée par des flux. On distingue les flux technologiques (distingués en flux principaux - ceux qui font effectivement l'objet de la transformation - et secondaires) en entrée ou sortie de la boîte, et les flux d'information (opératifs s'ils sont nécessaires à la transformation, informatifs s'ils sont utiles à la transformation). Par ailleurs, chaque module technologique reçoit des programmes et des objectifs, qui orientent l'activité du module (c'est son "projet"), et des *variables essentielles* qui mesurent ses activités et évaluent ses performances.

Le deuxième élément de l'AMS est le *module de pilotage* qui a pour mission de contrôler et de réguler les transformations opérées par les modules technologiques. Il prend en entrée des variables de contrôle qui sont les directives imposées au module par un niveau supérieur. En sortie, le module de pilotage transmet des directives au module technologique qui détaillent, précisent et adaptent les directives reçues sous forme d'autres variables de contrôle. Pour effectuer son pilotage, le module reçoit des informations internes fournies par les variables essentielles et des éléments de contrôle interne du module de pilotage. Il reçoit également des informations externes. Ces informations lui permettent d'agir sur la transformation du module technologique par l'intermédiaire de variables de réglage qui expriment non pas une planification stricte comme les variables de contrôle sortantes, mais les latitudes décisionnelles du module de pilotage par laquelle il peut moduler son contrôle dans certaines limites.

Dans l'AMS, une activité est représentée par un couple formé par un module technologique et un module de pilotage. Un système est une combinaison hiérarchisée d'activités. On retrouve ici le principe de l'analyse hiérarchisée de IDEF0 ou SADT (§ 6.2).

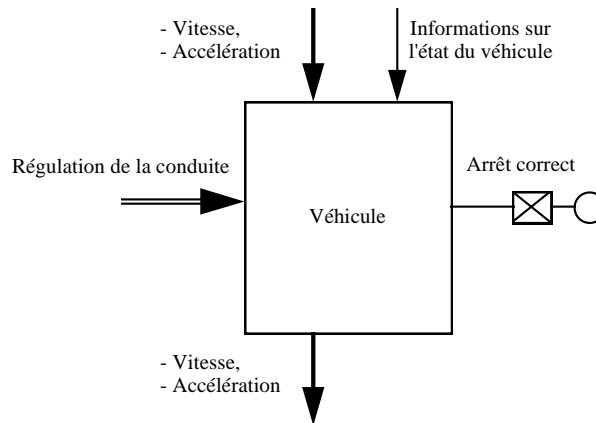


Figure 6.9. *Le véhicule comme module technologique dans le contexte des feux de circulation*

Dans le cadre des feux de circulation, on peut, par exemple (c'est la responsabilité du modélisateur !) choisir comme module technologique le véhicule placé à l'intersection. La transformation qui s'opère dans l'activité est la modification de sa vitesse et de son accélération. Les informations utiles sont, par exemple, des informations sur l'état du véhicule. L'objectif qui est assigné au véhicule est la régulation de la conduite à l'intersection. Comme souvent, les critères d'évaluation ou de mesure de performances n'existent pas dans ce cas, ou sont implicites. Pour pouvoir évaluer si l'objectif a été atteint, on peut par exemple inventer une variable "Arrêt correct" qui est un couple de valeurs (Couleur du feu, Arrêt), où Arrêt est une variable booléenne oui/non. L'objectif est atteint si par exemple cette variable prend la valeur (rouge, oui) ou (vert, non). On peut bien sûr inventer des variables essentielles plus sophistiquées. La description de ce module est résumée dans la figure 6.9.

Comme module de pilotage, il semble naturel (et ce n'est pas qu'une question de vocabulaire !), de définir le conducteur du véhicule. Les prescriptions qui lui sont soumises en tant que variables de contrôle sont celles du code de la route, qu'il doit adapter au cas qui lui est présenté. Les informations externes (au moins celles qui sont nécessaires) sont constituées par les couleurs de feux de circulation. Les informations internes sont fournies par la valeur de la variable essentielle (son état indique s'il est dans la bonne configuration, auquel cas, il doit d'urgence changer de conduite. Pour les variables de réglage, il a le choix entre une décélération/accélération ou un freinage pour moduler sa conduite. On obtient ainsi une description succincte de l'activité de conduite à une intersection (figure 6.10), description qui pourrait être raffinée en décomposant les modules en d'autres modules plus détaillés utilisant le même formalisme de description.

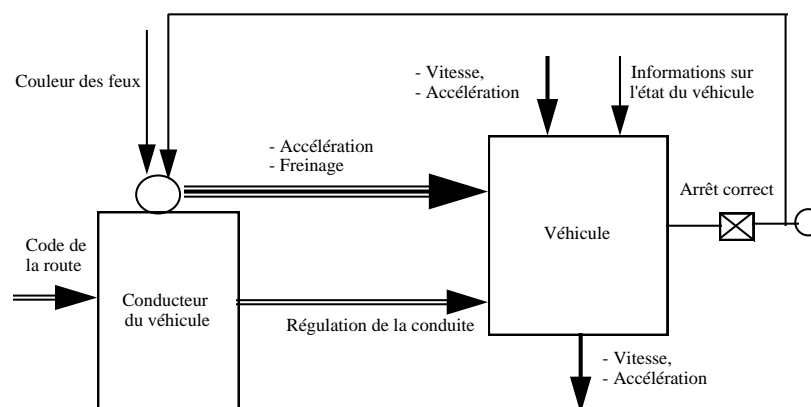


Figure 6.10. *L'activité de conduite à une intersection*

L'AMS fournit donc un langage de description des systèmes pour modéliser leur activité à travers l'interaction de modules de pilotage et de modules technologiques. Elle rappelle en cela la modélisation décrite au § 3.2, qui fournit une définition d'un système par les flux qui y circulent et où coexistent un sous-système de décision (qui peut également être appelé de pilotage) et un sous-système opérant (qui serait également le système technologique). On remarquera cependant que les informations transitent directement entre les modules, sans faire référence à un module de stockage, représentation et mise à disposition d'informations, ce en quoi l'AMS ne permet pas d'atteindre des caractéristiques de certains systèmes complexes.

6.5. La mise en contexte des activités : mythes et limites

6.5.1 Modélisation d'activité et "Business Process Modelling"

La phénoménologie du contexte telle qu'elle a été décrite ici met en jeu une description des fonctions, des activités qu'on peut recenser dans le système de connaissances étudié. Cet ensemble d'activités est structuré par les flux (souvent des flux de données) qu'elles échangent entre elles ou avec leur environnement. Contrairement aux modèles de tâches décrits dans le chapitre précédent, elles ne comportent pas de stratégies de poursuites d'objectifs ou de résolutions de problèmes, de prise en compte du temps etc.

Il s'agit en fait essentiellement de techniques d'analyse mises en œuvre pour ce qu'on appelle maintenant la "modélisation d'activité" (traduction personnelle de l'expression plus connue de "Business Process Modelling"). Cette modélisation est apparue nécessaire dans les entreprises lorsqu'elles ont décidé de "reconfigurer leur activité" (autre traduction personnelle découlant de "Business Process Reengineering", cf. [Sandoval 94]) pour des objectifs de gain de productivité. Il s'est alors révélé que, si les entreprises possédaient une réelle maîtrise de leurs procédés, un réel savoir-faire, elles avaient du mal à décrire cette maîtrise et où intervenait le savoir-faire dans leur chaîne de fabrication. Cette ignorance les mettait dans l'impossibilité de reconfigurer efficacement leur activité. De là vient la résurgence des méthodes descriptives, basées souvent sur les DFD (Diagrammes de Flux ou Flots de Données) telles que certaines décrites ci-dessus. Ces méthodes permettent d'identifier et situer les activités par rapport à leur contexte et de donner une vision globale, et d'être ainsi une aide efficace à la décision. La mise en contexte qui peut être faite dans un système de connaissances n'a pas d'autres buts : fournir une vision globale de l'activité afin d'être à même de choisir les modes de gestion efficaces et pertinents du système de connaissances en question.

6.5.2. La dualité Domaine/Activité

la notion de dualité est apparue clairement dans le couple (information, traitement de l'information) (chapitres 1 et 4), elle apparaît également dans le couple (structures sémantiques, tâches) (chapitres 2 et 5). Cette dualité est moins évidente dans le couple (domaine, activité), mais c'est sans doute le manque de réflexion sur ce sujet qui en est la cause, car cette dualité est de même nature que les autres, celle du couple (objet processé, objet processeur). Dans la modélisation SADT, la dualité est représentée par le couple (actigramme, datagramme) (nous n'avons pas détaillé les actigrammes ici), qui représente la relation entre les fonctions (les activités) et les données qu'elles manipulent. Il semble que cette dualité n'est pas pertinente dans la vision contextuelle développée ici : la modélisation des données n'apporte aucune maîtrise supplémentaire significative sur le système de connaissances étudié, d'où d'ailleurs le peu d'usage pratique qui en est le plus souvent fait. La dualité n'est donc pas dans la notion (mathématique) de fonction/arguments. Si, comme on l'a préconisé au chapitre 3, le domaine est représenté comme "tapissé de processus", le véritable but des activités présentes dans le système est donc d'agir sur ces processus. Il s'agit donc, pour obtenir la dualité, de représenter les interactions activités/processus. C'est par ce biais qu'on peut obtenir une véritable pertinence des modèles de contexte, autant en ce qui concerne les modèles du domaine (ontologie) que les modèles des activités (phénoménologie). Les recherches futures devront préciser ce point de vue.

Chapitre 7

La méthode MKSM

Avant-propos

Depuis la première édition de ce livre, en 1996 (ce qui signifie qu'il a été conçu plusieurs années avant), deux phénomènes concomitants ont fait beaucoup évoluer le paysage de l'ingénierie des connaissances.

Le premier est un phénomène général et encore mal contrôlé (en terme de définition et d'efficacité) qui est ce qu'on appelle désormais le « Knowledge Management » que nous appelions (et continuons à appeler) « Gestion des Connaissances », qui a fait ressortir de manière spectaculaire l'intérêt des technologies de la connaissance dans les entreprises (cf. infra.).

Le second, plus localisé, est le développement opérationnel des concepts qui ont été énoncés dans cet ouvrage, mis en œuvre dans la méthode déjà citée MKSM. Cette méthode a été appliquée, dans une optique de gestion des connaissances, dans des contextes extrêmement divers, et à des échelles très variées, d'une simple capitalisation d'un savoir d'expert jusqu'à des projets globaux de grande envergure. Les domaines abordés sont également divers : l'ingénierie sous toutes ses formes, bien sûr, mais aussi la finance, l'activité de conseil etc. Les principes de généralités énoncés dans ce livre commencent donc à trouver leur preuve opérationnelle, ce qui est l'aboutissement de toute recherche appliquée.

La recherche sur MKSM n'est pas encore terminée, et de nombreux points sont encore à l'étude qui aboutiront bientôt à une nouvelle version. Au stade de maturité où est la méthode, il nous a paru utile de rajouter, dans cette deuxième édition, un chapitre sur MKSM faisant le point sur son avancement. Une bibliographie complète sur de nombreux développements complémentaires et applications permet de compléter sa lecture.

7.1. Introduction

7.1.1. La gestion des connaissances dans les organisations

La connaissance, une valeur stratégique pour les entreprises

Ces dernières années, avec une force aussi soudaine qu'inattendue, la gestion des connaissances (« Knowledge Management ») s'est affirmée dans les entreprises comme un enjeu majeur. Un ensemble d'éléments stratégiques concourent à cette émergence :

1) la connaissance est un capital économique : il existe maintenant, dans le monde économique, une tendance forte et reconnue, qui montre que la valeur boursière d'une entreprise n'a plus qu'un lointain rapport avec sa valeur comptable, révélée par ses comptes d'exploitation (des entreprises comme Microsoft, Netscape, Amazon ... en sont la preuve). Des explications à ce phénomène, et d'autres moyens de calcul de la valeur de l'entreprise se mettent en place actuellement ([Evindson 99], [Strassmann.98], [Stewart 97] ...), centrés sur la notion de Capital Intellectuel, Immatériel, Intangible ou Capital de Connaissances. Ainsi, la gestion des connaissances est vue comme une gestion financière de valorisation et d'accumulation de ce capital.

2) la connaissance est une ressource stratégique : les nouveaux modes d'organisation du travail dans « l'entreprise post-taylorienne » (management par objectifs, travail coopératif ...), ont révélé l'importance du savoir-faire des acteurs dans les processus de production de biens et de services. Les savoirs et savoir-faire sont désormais reconnus comme des ressources essentielles pour optimiser ces processus. La productivité n'est plus seulement dans la force de travail et dans l'outil de production, mais passe désormais par la connaissance dans ce qu'on appelle déjà la « Knowledge Based Economy » [OCDE 96].

3) la connaissance est un facteur de stabilité : l'environnement économique et concurrentiel est dorénavant dans un état caractérisé par le « chaos déterministe » décrit par les mathématiciens. La prédictibilité des besoins, des marchés est difficilement possible, sinon impossible, et le mot d'ordre des entreprises est maintenant la réactivité, voire la « proactivité ». Mais l'entreprise, dans un environnement instable, a besoin de valeurs sur lesquelles reposer sa légitimité. C'est dans sa culture et son patrimoine de connaissances propres qu'elle peut désormais les trouver.

4) la connaissance apporte un avantage concurrentiel décisif : ceci correspond à une vision nouvelle de l'entreprise sur le marché concurrentiel. Les entreprises ne se différencient plus par leurs outils de production, qui sont maintenant standardisés à travers le monde. Elles doivent assurer à leur client qu'elles savent non seulement produire, mais produire mieux que les concurrents. La première étape est l'assurance qualité, qui certifie les procédés de réalisation. Mais la démarche qualité ne constituera bientôt plus un différentiel concurrentiel suffisant. L'étape suivante consiste alors à assurer au client que les entreprises intègrent dans leur produit tout leur capital de savoir-faire et d'expérience.

Les objectifs de la gestion des connaissances

La vision stratégique, que peuvent avoir maintenant les dirigeants d'entreprise sur leur patrimoine de connaissances, les amène à définir des objectifs globaux pour gérer au mieux cette ressource. Ces objectifs s'articulent toujours autour de trois points-clés :

1) Capitaliser : le mot d'ordre correspondant peut se résumer par “ *Savoir d'où l'on vient, savoir où l'on est, pour mieux savoir où l'on va* ”. Il procède d'une logique “ évolutionniste ” de la connaissance, à savoir que l'évolution des connaissances (et donc de l'entreprise) se fait toujours à partir d'un patrimoine existant.

2) Partager : le mot d'ordre correspondant peut se résumer par “ *Passer de l'intelligence individuelle à l'intelligence collective* ”. Il est l'aboutissement du constat que, actuellement, dans la gestion de la complexité de leur processus, les entreprises ne peuvent plus se satisfaire des actions individuelles des acteurs (fussent-elles “ héroïques ” ou “ géniales ”), mais doivent les intégrer dans des ensembles collaboratifs harmonieux et créatifs.

3) Créer : le mot d'ordre correspondant peut se résumer par “ *Créer, innover pour survivre* ”. Dans le monde économique actuel, la survie des entreprises passe par une innovation constante et soutenue. Le processus de créativité et d'innovation des entreprises passe désormais par une interaction bien comprise et bien gérée entre ses ressources internes de savoir et son environnement économique et concurrentiel [Ermine 99].

Il est à remarquer que ces objectifs de management sont de véritables “ injonctions paradoxales ”, qui en font des réels enjeux culturels dans l'entreprise : les entreprises “ qui vont de l'avant ” ne sont pas réellement disposées à se retourner sur leur passé (surtout en ce qui concerne les échecs !), le partage n'est pas vraiment une tendance naturelle dans les enjeux des organisations (“ Knowledge is Power ” !), et personne ne peut, par directive, forcer les gens à être créatifs. Il en résulte que la gestion des connaissances est un défi managérial considérable qui s'inscrit dans un changement à long terme et dans de nouvelles visions de l'entreprise.

7.1.2. La gestion du patrimoine de connaissances

Ainsi donc, l'ensemble des connaissances d'une organisation est une véritable richesse qu'il convient de gérer au mieux. Mais si, pour des raisons qu'on devine aisément, des efforts sont faits pour rendre tangible cette richesse en termes monétaires, il est intéressant de la rendre tangible en terme d'informations, c'est à dire de rendre visible le capital de connaissances. Une visibilité accrue sur le patrimoine de connaissances a de multiples avantages. Ceci paraît évident si l'on se réfère aux objectifs énoncés ci-dessus : capitalisation (au sens non économique, proche de “ mémorisation ”, évoqué ci-dessus), partage (on transmet mieux, et surtout à une plus grande échelle, ce qui est visible), et création, notamment en relation avec les flux provenant de l'environnement [Ermine 99].

Il y a de nombreuses approches pour améliorer la visibilité sur son patrimoine. Une des plus courantes, est de travailler sur son patrimoine d'information, qui lui, est déjà tangible. C'est la lignée des nouvelles technologies de l'information, avec la gestion électronique des documents, les moteurs de recherche en intranet, les “ datawarehouse ”, “ data mining ” etc. Une autre est de travailler sur son organisation, en privilégiant les relations coopératives entre les acteurs (ce qui d'ailleurs apporte assez peu de gains de visibilité), c'est la lignée de la gestion des “ connaissances tacites ”, des outils de type “ groupware ” etc. Une autre approche est l'élaboration d'une structure de ce patrimoine en compétences, métiers etc., une autre est d'organiser la transcription partielle de ce patrimoine (assurance qualité, retour d'expérience, écrits ...). Bref, la panoplie est très large, et souvent, toutes ces approches sont utilisées de manière imbriquée. Elles ont cependant une caractéristique commune, c'est de ne pas aborder le problème de la connaissance de manière spécifique, mais par un biais qui est vite assimilé à la connaissance elle-même (connaissance/information, connaissance/compétence, savoir-faire/procédure ..., pour ne citer que les plus courants). Elles amènent, pour certaines d'entre elles, des solutions hâtives, risquant d'être inadaptées, par une vision très instrumentale (l'arrivée massive et tonitruante des nouvelles technologies de l'information n'est d'ailleurs pas étrangère à ce phénomène).

On peut tenter d'avoir une approche différente, en se posant le problème du contenu du patrimoine de connaissances. Ceci nécessite de répondre à deux questions : quelle est la nature de la connaissance dans une entreprise ? et comment capter et partager cette connaissance ? La première est une question de nature théorique, la seconde une question d'ingénierie. La réponse à ces questions permet d'envisager une opération stratégique de capitalisation de connaissances, sur une partie, analysée au préalable comme critique, du patrimoine.

La méthode MKSM⁵⁶

La méthode MKSM a été élaborée au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) pour tenter de répondre à ces questions. Le CEA, organisme de recherche public, étant en France un des grands producteurs de connaissances, à forte vocation technologique, se devait d'apporter une contribution au problème, crucial pour lui, de la gestion de ses connaissances. Il a produit, dans cette optique, depuis plus d'une dizaine d'années, un ensemble de méthodes et d'outils concernant cette problématique (SPIRIT, SPIRAL, REX, SAGACE ...). MKSM est une méthode basée sur les travaux antérieurs de l'auteur [Ermine 93] et a été appliquée la première fois au CEA en 1993 [Leblanc 94]. Elle s'est développée depuis au CEA sur des projets de grande envergure, et est utilisée ou a été évaluée par un certain nombre d'entreprises ou d'organisations de nature diverse, (EDF, Cofinoga, DCN, Saint-Gobain, Technicatome, Thomson CSF, La Poste, Rhône-Poulenc, ONERA, Gaz de France ...), y compris des PME. Les raisons qui poussent à utiliser une méthode comme MKSM sont multiples. On peut citer entre autres :

- Capitalisation de savoir d'experts partant à la retraite ou d'équipes de spécialistes redéployées
- Structuration de corpus d'informations et/ou de documents
- Intégration de savoir-faire dans des procédés industriels ou des processus d'entreprise pour améliorer leur productivité et leur compétitivité
- Diffusion des connaissances des meilleurs experts à travers des outils variés (hypermédia, aide à la décision, livres, formation ...)

Les mots-clés caractérisant la méthode sont résumés ci-dessous :

Théorie : On ne peut pas aborder sérieusement les problèmes de la connaissance en ignorant la masse immense de travaux, dans des disciplines nombreuses et diverses, qui ont été menés sur ce sujet. Les fondements théoriques de MKSM sont développés dans [Ermine 96a], le premier article de référence paru sur la méthode est [Ermine 96b]. Elle a été l'objet de plusieurs thèses, et d'une vingtaine de publications qui exposent des développements théoriques ou des études de cas.

Démarche : MKSM est une méthode d'analyse préalable à la mise en place d'un système opérationnel de gestion des connaissances, c'est à dire un système, informatisé ou pas, qui contient des connaissances, des savoir-faire et dont le but est soit de faire partager, soit de capitaliser, soit de servir à la création de la connaissance dans l'organisation. Elle propose donc une étape entre l'approche stratégique, qui vise à mettre en place des objectifs de gestion des connaissances à l'échelle de l'entreprise, et l'approche opérationnelle qui est l'implémentation effective d'un système. L'introduction de cette étape n'est pas innocente, et nécessite une *démarche* de type " démarche de changement ".

Recueil de connaissances : MKSM procède par *recueil des connaissances* auprès des " sources de connaissances " de l'entreprise. Il s'agit essentiellement des détenteurs du savoir : experts, spécialistes, ou de documents de références (mais avec des personnes capables de les expliquer). C'est un processus qui n'est pas évident à organiser à une échelle industrielle, puisqu'elle nécessite, outre des interviews nombreuses, des actions de mobilisation, de mise en cohésion, de consensus etc.

Modélisation des connaissances : MKSM est basée sur la *modélisation des connaissances*. On le verra ci-dessous, MKSM n'utilise pas *un* modèle mais *des* modèles, qui correspondent à des points de vue différents sur un seul domaine, considéré comme un *système de connaissances* à part entière.

Livre de Connaissances : le résultat obtenu en premier lieu dans un projet MKSM est un ensemble de modèles formalisant la connaissance, qui ont été notamment élaborés pendant les entrevues avec les détenteurs de cette connaissance. Il peut être suffisant en soi si l'on désire passer immédiatement à une application informatique précise par exemple (système d'aide à la décision, base de données ...). Historiquement, MKSM

⁵⁶ MKSM était au début le sigle de " Method for Knowledge Systems Management ". Il vaut mieux maintenant le prendre comme un simple identifiant !

2) L'axiome de la structure d'un système de connaissances (Figure 7.2) : **le système de connaissances de l'entreprise est structuré par le macroscopie de la connaissance :**

Deux hypothèses sont à la base de la définition de la connaissance selon le macroscopie. La première est **l'hypothèse "sémiotique"**, à savoir que la connaissance se perçoit comme un signe, qui contient de l'*information* (quelle est la forme codée ou perçue du signe que je reçois ?), du *sens* (quelle représentation l'information engendre-t-elle dans mon esprit ?), et du *contexte* (quel environnement conditionne le sens que je mets sur l'information reçue ?). L'exemple typique est celui d'une montre, qui communique une information codée (et si l'on y réfléchit bien, le code est extrêmement complexe, avec son cadran, ses aiguilles (éventuellement), aux formes et configurations très variées etc.), qui prend des significations très diverses (celle de base étant l'heure !), ces significations dépendant de situations et de contextes potentiellement infinis (rendez-vous, horaires, expériences, suivis de process, planification...). La deuxième hypothèse est **l'hypothèse "systémique"**, à savoir que la connaissance se perçoit comme un système global, avec toujours trois points de vue : la *structure*, la *fonction* et l'*évolution*. Ainsi, pour décrire une montre, on peut en parler par sa fonction (donner l'heure ...), par sa structure (boîtier, mécanisme, design etc.), par sa position dans l'évolution des montres (électrique ou mécanique, digitale, avec aiguilles ou cristaux liquides, à quelle mode elle est rattachée etc.).

Analyser la connaissance, c'est donc la décrire à travers cet ensemble de points de vue : information, sens, contexte d'une part, structure, fonction, évolution d'autre part. Ces points de vue sont extrêmement liés et souvent confondus. En général, un discours sur un domaine de connaissance, même construit, ne distingue pas ces points de vue et les emmêle inextricablement. L'analyse, notamment dans MKSM, s'attache à les prendre un par un, et donne ainsi un "fil rouge" à dévider.

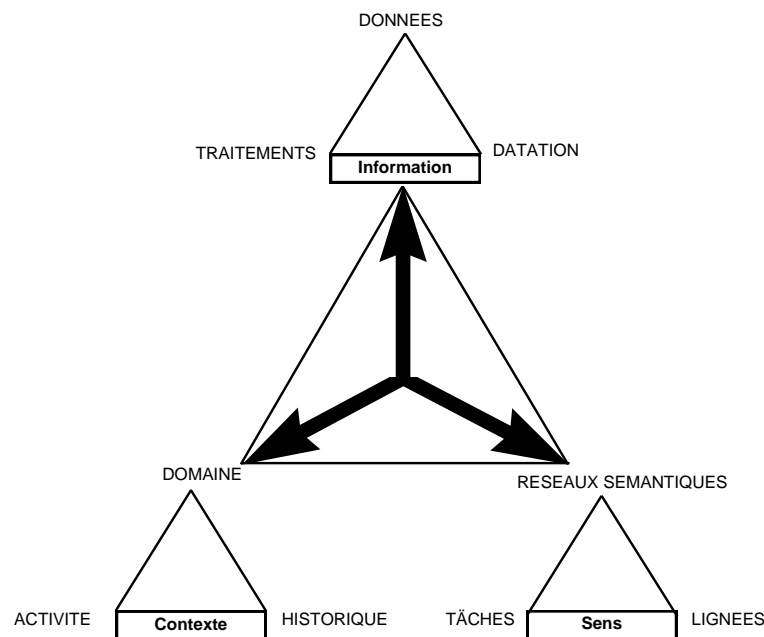


Figure 7.2. L'axiome du macroscopie de la connaissance

Une analyse fine, qui recoupe notamment de nombreux travaux qui se sont déjà faits dans les méthodes d'analyse de l'information (méthode MERISE par exemple), ou en Intelligence Artificielle (méthode KADS par exemple), permet d'organiser ces points de vue : on part de chaque point de vue "sémiotique" qu'on peut analyser suivant les trois points de vue "systémiques". Ainsi, l'information se décrit (ce qui est classique) en termes de *données* - ou structures de données - (aspect structurel) et de *traitements* - ou structure de contrôle - (aspect fonctionnel). Le sens se décrit en termes de *réseaux sémantiques* (aspect structurel), caractéristique de la structure de la mémoire humaine et de *tâches (cognitives)* (aspect fonctionnel), caractéristique de la représentation cognitive de l'action chez l'être humain. Le contexte se représente par une description générale de l'*activité* (analyse fonctionnelle), et une description générale des concepts du *domaine* (aspect structurel). En ce qui concerne les aspects de l'évolution, qui ne sont pas encore tout à fait intégrés à la version standard de MKSM [Barthelmé 98], ils sont décrits par des informations de type *datation* (versions, dates etc.), l'aspect contextuel se représente par une modélisation de l'*historique*, et le sens qui peut être donné à l'évolution des concepts, des

solutions, des objets techniques etc. élaborés au cours du temps dans l'entreprise est représenté par des "classifications génétiques" construites a posteriori qu'on appelle des *lignées* (arbres technologiques etc.).

7.3. Les modèles de MKSM

7.3.1. Le système de référence

En général, un projet de gestion de connaissances, basé sur une analyse MKSM, ne s'effectue pas (ou tout au moins ne débute pas) sur l'ensemble des connaissances de l'entreprise, mais sur une partie significative. Souvent cette partie est identifiée rapidement, intuitivement, avant d'être analysée : on donne un ou plusieurs intitulés plus ou moins vagues, on désigne des acteurs susceptibles d'être détenteurs de cette connaissance, et on se presse de lancer le processus MKSM ! Il est parfois utile de réfléchir quelque peu en préalable sur l'identification plus poussée de la partie du patrimoine de connaissances qu'on veut analyser. Pour cela, MKSM propose de préciser en détail cette partie pour fournir ce qu'on appellera le *système de référence* du projet.

Le *système de référence* désigne le système de transformation des flux intrants en flux intrants qui répond à une finalité donnée, avec ses quatre composants : opérant, information, décision et patrimoine de connaissances, qu'on résume dans le terme de *modèle OI DC* (figure 1). Il est caractéristique de la mobilisation d'un certain nombre de connaissances et de savoir-faire en vue d'un objectif

Le modèle de la figure 7.1 permet d'identifier et caractériser les connaissances et les flux cognitifs d'un système, et réaliser ainsi une première cartographie des connaissances. C'est la phase préliminaire de modélisation dans MKSM, qui *définit* et *délimite* le système sur lequel on désire travailler. Cette modélisation n'est pas toujours nécessaire et est peu liée aux suivantes.

La première étape consiste en la définition précise des intrants et des extrants. C'est en fait cette définition qui conditionne la définition du système dont le patrimoine de connaissances est à gérer. Cette définition ne peut se faire qu'à travers l'explicitation d'une finalité du système, qui est choisie comme référence. Toute la suite des modélisations se fera en respectant cette finalité. Dans le système opérant et le système de décision, on identifie ensuite les acteurs qui participent à l'enrichissement ou l'utilisation du patrimoine de connaissances, sous forme d'*agents cognitifs*. Cette appellation, fortement connotée dans certains courants de recherche, est simplement utilisée parce que chacun de ces agents détient des connaissances qu'il s'agit d'identifier. On ne s'intéresse pas pour l'instant aux réseaux "sociaux" de ces agents, à leur système de coopération ou de coordination. Le terme d'agent cognitif est pris au sens large, il peut s'agir bien sûr de personnes physiques (opérateurs, spécialistes, responsables, managers...) mais aussi de matériels (procédés...), de sous systèmes spécifiques (service statistique, service juridique, organisation externe...) pour autant qu'elles sont porteuses de connaissances. Outre sa désignation, un agent cognitif est caractérisé par les attributs suivants : rôle, informations consommées, informations produites, connaissances utilisées, connaissances apportées. Les informations sont données en termes d'information "matérialisable" sous forme de documents, données électroniques, etc. Les connaissances sont données en termes de savoirs ou savoir-faire, savoir-être etc. du domaine. Les informations identifiées sont placées dans le système d'information (elles doivent donc être en cohérence avec les éventuelles autres sources d'information qui s'y trouvent) et les connaissances constituent le patrimoine (cette méthode est un bon moyen de l'identifier). Comme ces dernières peuvent être nombreuses et détaillées, il peut être utile de les regrouper en classes générales et d'en créer ainsi une classification sommaire. Ce sont les éléments les plus génériques qui figurent sur le schéma synthétique de la figure 7.1. Il peut en être de même pour les agents.

7.3.2. Le modèle du domaine

Une phase de modélisation proprement dite de MKSM est la mise en contexte des connaissances du domaine de connaissance concerné. L'hypothèse qui est mise en œuvre est que les principaux concepts qui permettent de décrire ce domaine peuvent s'identifier à travers les phénomènes généraux qui sont à la base des savoirs. Ces phénomènes (on parle aussi de "processus", ou d'"effets") sont ceux que l'on cherche à maîtriser, connaître, déclencher, optimiser, inhiber, ou modérer dans l'activité métier à laquelle on s'intéresse.

Les phénomènes considérés sont en général traités par les sciences physiques, chimiques, biologiques, sociales etc. Ils font donc l'objet de grands nombres d'études, de publications, d'enseignements dans ces disciplines. En général, ces phénomènes, relevant d'une observation qualitative de prime abord, sont décrits par des modèles quantitatifs (modèles mathématiques, modèles numériques, modèles d'automatique etc.) qui les

rendent compliqués pour une appréhension globale et sont donc souvent insuffisants pour des actions de gestion des connaissances. Cependant, le métier auquel on s'intéresse dans le cadre d'un projet de gestion des connaissances, aborde toujours ces phénomènes selon une vision qui lui est propre. L'expérience montre que ce modèle est indispensable et complémentaire des documents habituels (scientifiques, de référence etc.). De plus, concrètement, la description de la vision métier des phénomènes permet de positionner les termes du domaine qui, sinon, seraient employés de manière imprécise dans d'autres points de vue ou d'autres documents.

Le plus souvent les phénomènes étudiés sont énoncés verbalement ou transcrits en texte libre plus ou moins structuré. Sans guide, c'est souvent insuffisant pour restituer qualitativement des phénomènes complexes. Les nombreuses interactions qui doivent être prises en compte sont délicates à identifier et le sens des termes utilisés doit être précisé. Les modèles visuels sont plus performants pour prendre en compte la complexité car ils privilégient les interactions entre les termes utilisés et permettent une meilleure vision globale. Une telle approche est courante, et, par exemple, plusieurs approches graphiques sont utilisées dans différentes disciplines scientifiques en complément des modèles quantitatifs. MKSM propose un diagramme générique pour restituer les modèles qualitatifs des phénomènes à décrire dans un projet donné. Ce diagramme est appelé *diagramme SCFC* (pour Source, Cible, Flux, Champ) C'est un diagramme relativement original dans les approches de modélisation, il est parfois difficile d'utilisation au début, mais les nombreux projets où il a été utilisé ont montré son pouvoir structurant et synthétique (le nombre de diagrammes à réaliser dans un domaine de connaissances est de l'ordre d'une à deux dizaines en moyenne).

Un phénomène prend sa source dans un système qu'on identifie et qui s'appelle donc système source, dans ce système se produit un phénomène (ou plusieurs), qu'on appelle donc phénomène source (ou action source). Ce phénomène source est à l'origine d'un flux, ce flux est un flux de matière, d'énergie, d'information ou encore un flux cognitif, émotionnel, un flux financier etc. Dans une activité, un métier donné, on regarde l'interaction de ce flux avec un autre système qu'on appelle le système cible, cette interaction est révélée par un phénomène (ou plusieurs) qui se produit au sein de ce système, qu'on appelle donc phénomène cible. Le phénomène à décrire est donc caractérisé par une interaction, via un flux, entre deux sous-systèmes. Pour rendre la description complète, on rajoute ce qu'on appelle le champ actif. Il est constitué des objets qui ne font pas, à proprement parler, partie du phénomène considéré mais qui agissent sur lui (par exemple, dans un phénomène d'incendie, le champ actif comprendra les conditions météorologiques qui ne font pas partie du phénomène mais qui l'influencent fortement ; en chimie, le catalyseur constitue un exemple classique d'élément du champ actif pour le phénomène de la réaction considérée). Le champ actif est une sorte " d'environnement d'influence " et décrit les " boutons " sur lesquels on peut agir ou les paramètres qui doivent être pris en compte dans l'étude de l'interaction entre le phénomène source et le phénomène cible.

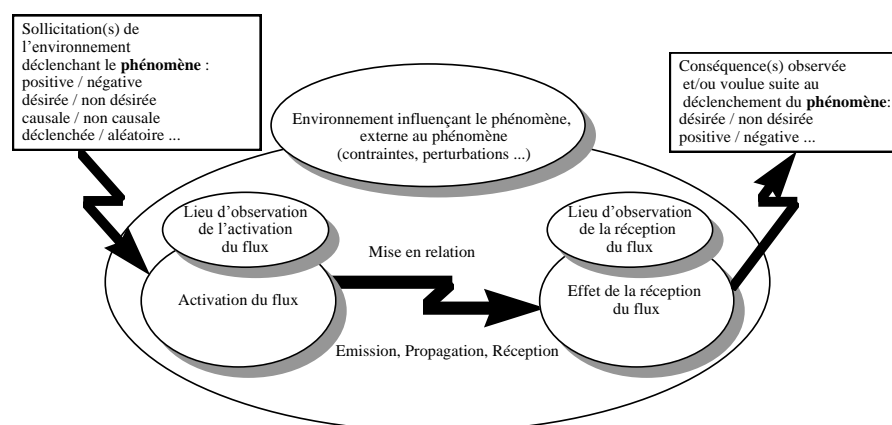


Figure 7.3. Le diagramme SCFC

Les relations d'un phénomène avec son environnement sont décrites par son événement initiateur (ou événement déclencheur). L'événement initiateur regroupe les événements qui conditionnent l'activation du phénomène dans sa globalité. D'autre part, en sortie, on définit la conséquence du phénomène, qui regroupe l'ensemble des événements qui sont les conséquences, favorables ou néfastes, du phénomène dans l'activité, le métier concerné par le domaine de connaissances.

Chaque élément du modèle est précisé par des caractéristiques (parfois appelés des propriétés), qui sont des grandeurs, des paramètres, des observables (quantitatifs, qualitatifs) qui permettent aux experts, aux personnes du métier de caractériser, de reconnaître les éléments décrits dans le phénomène.

L'ensemble des phénomènes peuvent être reliés par des liens de causalité, d'enchaînement d'influence etc. et fournir ainsi des *scénarios* de phénomènes qui complètent la description du domaine. L'ensemble des phénomènes sous forme de modèles SCFC et l'ensemble des scénarios constitue le *modèle du domaine* de MKSM. Il est en général complété par des *fiches descriptives ou scientifiques*, (ou autres), rédigées par des experts pour chaque phénomène. La fiche descriptive est une transcription en texte du diagramme SCFC dont elle facilite la compréhension. Elle peut contenir des informations supplémentaires, des plans ou des photos. La fiche scientifique complète le diagramme SCFC et la fiche descriptive avec les informations scientifiques disponibles sur le phénomène. Typiquement, elle contient des équations, des courbes, des ordres de grandeur, des exemples de calcul, des résultats d'expériences etc.

Des fiches documentaires (ou bibliographiques) relient le modèle du domaine à la documentation disponible. Pour chaque phénomène, la fiche documentaire associée est constituée de la liste des références documentaires qui sont pertinentes pour ce phénomène. Les références documentaires les plus importantes peuvent être soulignées parmi toutes celles qui sont fournies dans la fiche

7.3.3. Le modèle d'activité

L'autre phase de modélisation dans MKSM qui correspond à la mise en contexte des connaissances, est une analyse de l'activité du système qui produit ou utilise les connaissances. Elle cherche à replacer les connaissances du domaine (décrites ci-dessus dans les phénomènes) dans le cadre d'une utilisation opérationnelle. L'activité est celle qui est nécessaire à contrôler, dans le métier considéré, les phénomènes qui ont été décrits (éventuellement) dans la phase précédente.

Ce qu'on appelle *modèle d'activité* est une décomposition en grandes phases (sous-activités) du métier considéré, ces grandes phases étant articulées entre elles par des échanges de données, de flux de matière etc. Il s'agit d'une analyse de type "fonctionnelle" descendante, où chaque activité est décomposée hiérarchiquement en sous-activités de plus bas niveau. Cette analyse est "guidée par les données", dans le sens où elle est une simple description structurée des activités (des "fonctions") du système, reliées par les flux (le plus souvent représentés par des données) qu'elles échangent. Le langage de modélisation est classique, il reprend et adapte les caractéristiques du langage bien connu SADT. Nous le détaillerons donc peu.

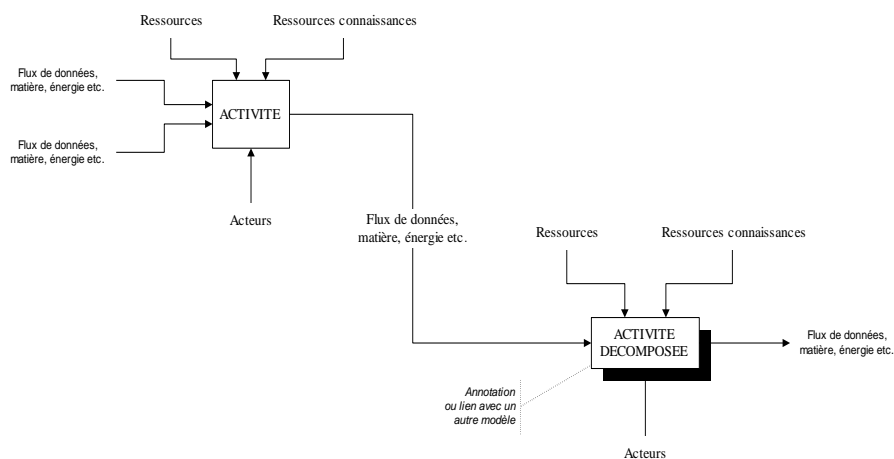


Figure 7.4. Le

diagramme du modèle d'activité

L'analyse de toute activité est descendante, hiérarchique, modulaire et structurée. La modélisation décrit l'activité en termes d'entrées, sorties, ressources et acteurs. Les entrées sont les flux utilisés par l'activité, elles peuvent être constituées de matière, d'information etc., les sorties sont les résultats fournis, ce sont également des flux. Les ressources sont les informations, les matériels, les procédures etc. nécessaires à l'accomplissement de l'activité. On distingue plus particulièrement les ressources connaissances qui sont nécessaires (ou du moins utiles) à l'accomplissement de l'activité. Les ressources de type connaissance font souvent référence

explicitement aux phénomènes décrits dans le modèle du domaine. Les acteurs sont ceux qui accomplissent l'activité. Graphiquement, l'activité est représentée par une cellule (un rectangle symbolisant la boîte noire), et les autres éléments sont représentés par des flèches. Une activité représentée par un rectangle ombré est décomposée dans un autre diagramme, permettant ainsi une description hiérarchisée. Les différentes boîtes peuvent être connectées par leurs interfaces, les entrées d'une activité pouvant être les sorties ou les ressources d'une autre fonction et ainsi de suite. On peut ainsi décrire une succession d'activités, succession qui est souvent, mais pas nécessairement, temporelle, et qui décrit une activité globale de plus haut niveau. D'autres connexions avec le modèle du domaine sont parfois identifiées, car les activités sont clairement identifiées en fonction de leurs capacités à déclencher ou inhiber certains phénomènes du domaine.

La description hiérarchisée des activités est un avantage d'un tel langage. La description arborescente de la hiérarchie des activités fournit l'arbre fonctionnel du modèle d'activité, qui donne une vue globale de la décomposition.

En termes de documents associés, il est intéressant de lier les activités identifiées dans ce modèle à des fiches de Retour d'Expérience. Une telle fiche se rattache à une activité donnée. Elle comporte un nombre de champs à renseigner qui sont en général les suivants (ex : [Eichenbaum 94])

- Activité concernée (référence à l'activité du modèle concernée)
- Introduction/contexte (circonstances, environnement global où se place l'événement décrit)
- Observation/Constatation/fait Technique (décrit sans interprétation un fait établi, observé ou constaté (description de l'expérience vécue))
- Diagnostic/Avis/Commentaire (point de vue de l'auteur sur le fait observé)
- Recommandation/Conclusion (recommandations pour l'avenir : conseils, mises en garde, souhaits ...)
- Remarques (Autres points à prendre en compte (points critiques, historiques, références ...))

7.3.4. Le modèle des concepts

Les modèles présentés aux § précédents (modèle du domaine et modèle d'activité) permettent de mettre en contexte l'ensemble des connaissances que l'on désire gérer. C'est une analyse globale, qui utilise des concepts et des méthodes systémiques. Les autres phases de modélisation de MKSM partent d'un autre point de vue, qui est celui de la sémantique dans le microscope. Elles se proposent de fournir des modèles qui reflètent le sens qui peut être donné à un ensemble de connaissances, dans l'optique de l'expression "prendre du sens", par rapport à la représentation mentale que peut se construire un être humain dans une activité de résolution d'un problème précis. Elles décrivent de manière précise les savoirs et les savoir-faire qui sont mis en oeuvre dans le système de connaissances étudié, tels qu'ils sont supposés être stockés dans les structures mentales sémantiques de l'être humain.

Cette étape peut être considérée comme le passage à une "granularité" plus fine de la connaissance par rapport à l'étape précédente, qui se contente de mettre en contexte la connaissance. Elle est liée donc à des parties plus petites du système de connaissances, notamment aux expertises et aux savoir-faire précis. Concrètement, elle prend sa place quand le niveau de détail requis ne peut plus s'exprimer de manière "satisfaisante" dans les modèles du domaine ou d'activité. Il devient alors "naturellement" nécessaire d'utiliser d'autres langages de description. C'est ainsi que se repèrent les liens entre les modèles de la première étape et ceux de la seconde.

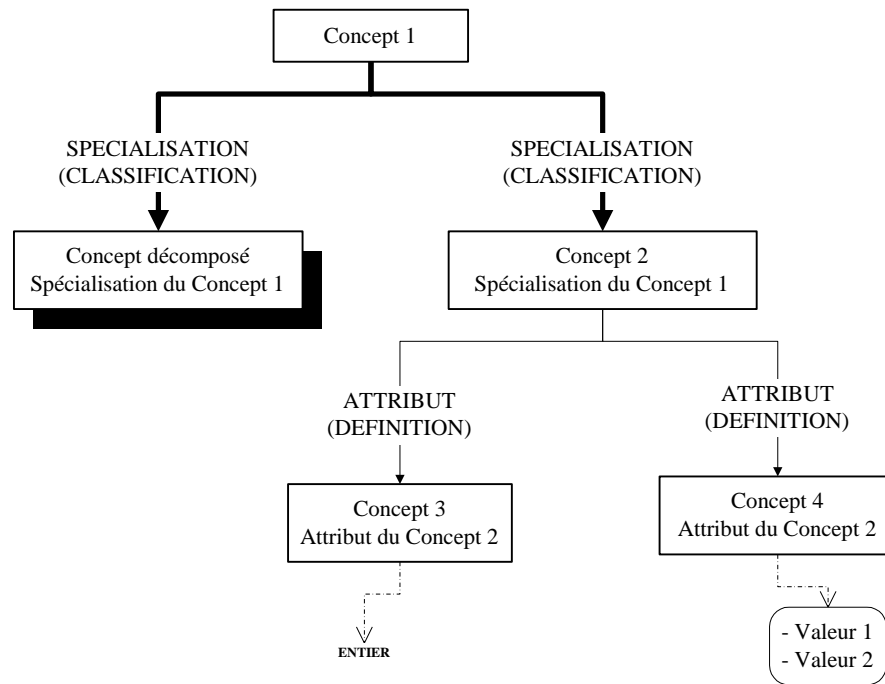


Figure 7.5. Le diagramme du modèle des concepts

Le *modèle des concepts* représente l'aspect "statique" de la connaissance. Il traduit la structuration conceptuelle d'un expert, d'une personne habituée à travailler dans un domaine précis. Cette structuration est donnée sous la forme d'une classification des concepts, des objets du domaine. La classification est une activité cognitive naturelle de base de l'être humain. Toute connaissance est caractérisée par la possibilité de donner une taxinomie fine du domaine, bâtie au fil de l'expérience. Cette taxinomie est donnée en terme de classes d'objets, de concepts dont les noms sont caractéristiques, et dont la définition "utile" dans un métier donné est souvent réduite à quelques caractéristiques (une voiture pour un vendeur est définie par un petit nombre d'attributs - ce qui n'est pas le cas pour un constructeur). Le modèle des concepts restitue cette connaissance telle qu'elle est stockée (selon la psychologie cognitive) dans l'esprit humain. Le modèle utilisé est relativement classique et s'inspire des réseaux sémantiques de la psychologie cognitive et des modèles objets de l'informatique.

Un objet décrit une entité du monde réel. De même que cette entité est unique, un objet est unique: il possède donc une identité propre. Un concept désigne une catégorie d'objets ayant des propriétés communes. Un objet appartient forcément à un concept: on dit alors qu'il est une instance de ce concept. Les propriétés communes aux objets d'un concept sont représentées par des attributs. Les attributs permettent par exemple de modéliser que toute instance du concept *voiture* a une couleur, roule à une certaine vitesse, et possède 4 roues. On dira alors que le concept *voiture* a comme attributs *couleur*, *vitesse*, et *roue*, qui sont eux-mêmes des concepts. Dans le cas de l'attribut *roue*, on dira qu'il est multivalué et qu'il a exactement 4 valeurs.

On veut de plus décrire de quelle façon les concepts sont organisés. On utilise pour cela la relation de spécialisation qui permet de hiérarchiser les concepts, et d'exprimer par exemple que les voitures sont une sous catégorie des véhicules. On dira alors que le concept *voiture* spécialise le concept *véhicule*. La relation de généralisation exprime la démarche inverse.

On donne enfin des concepts de base, ou types, qui sont définis de deux manières :

- par intension : on définit de façon générique les instances du concept, comme par exemple les réels, les chaînes de caractères et les booléens.
- par extension : on nomme toutes les instances du concept, comme par exemple *jours de la semaine* dont les instances sont *lundi, mardi...*

Tout concept est défini à partir d'autres concepts et des concepts de base, en utilisant la relation de spécialisation, ainsi que les attributs.

On en donne la syntaxe graphique dans la figure 7.5. Les traits gras représentent les liens de spécialisation (classification de concepts), les traits fins les liens attributs (définition de concept), et les traits pointillés les liens de valeurs. Comme dans le modèle d'activité, une case ombrée renvoie à un autre diagramme pour la décomposition du concept considéré.

7.3.5. Le modèle des tâches

Le *modèle des tâches* de MKSM décrit la connaissance dynamique. C'est une représentation de la stratégie mise en œuvre pour résoudre le ou les problèmes qui sont posés dans des cas précis concernant le système de connaissances considéré. La connaissance dynamique est vue sous deux angles. Le premier est celui de la résolution de problèmes. Il s'agit de modéliser la résolution d'un seul ou d'un petit nombre de problèmes donnés et identifiés. L'aspect résolution de problème de la connaissance dynamique se résume à deux questions : "quel type de tâche doit-on résoudre ?" et "comment résout-on généralement ce type de tâche ?". Ce premier aspect prend souvent le pas sur le second dans les applications. Le deuxième aspect de la connaissance dynamique est celui de la manipulation de la connaissance statique. On a construit, grâce au modèle des concepts, une représentation des objets du domaine en faisant peu référence à leur utilisation. La question se pose maintenant "comment utiliser cette connaissance statique pour résoudre le ou les problèmes posés ?". C'est une approche distincte du premier aspect, mais tout à fait complémentaire, qui permet de guider le travail d'élaboration des modèles de tâches à travers la connaissance statique (il est à noter que ces approches ont été souvent antagonistes).

Le langage de MKSM, pour construire un modèle de tâches, comporte la description de l'ordonnement des tâches à accomplir par une décomposition hiérarchisée, arborescente qui raffine récursivement les tâches de plus haut niveau en sous-tâches plus détaillées, jusqu'à aboutir à des tâches qu'on considère comme terminales. Chaque tâche qui se décompose possède un *type* qui décrit le contrôle qu'elle exerce sur l'exécution de l'ensemble de ses sous-tâches. Ainsi, une tâche séquentielle exécutera successivement chacune de ses sous-tâches dans l'ordre donné, une tâche alternative exécutera la sous-tâche dont la condition d'application est vérifiée, une tâche parallèle exécutera ses sous-tâches en parallèle, une tâche répétitive exécutera une même sous-tâche successivement avec des paramètres différents etc. L'arbre de décomposition est caractéristique de la stratégie de résolution de problème et peut être représenté graphiquement. Par ailleurs, les tâches manipulent la connaissance statique, elles échangent donc des données qui proviennent des réseaux sémantiques élaborés précédemment. Cet échange de données constitue le *flot de données* (sémantiques) de la connaissance dynamique. Pour des raisons de lisibilité et de simplicité, ce flot de données ne peut être représenté graphiquement. Ainsi le modèle des tâches dans MKSM se distingue nettement du modèle d'activité. D'abord, il ne représente pas le même point de vue et il se situe à un niveau de granularité plus fin. Ensuite, il se construit par une analyse guidée par l'ordonnement des tâches, où ce qui importe, ce ne sont pas les données qu'échangent les tâches, mais la manière dont celles-ci s'agencent pour résoudre un problème précis.

Une tâche peut être terminale si on ne souhaite pas pousser plus loin son analyse (elle peut faire l'objet d'une représentation par un algorithme ou autre, ou être considérée comme "connue de tous", ou au contraire impossible à analyser plus avant...). Sinon, la tâche est décomposable en plusieurs sous-tâches. L'ensemble de ces sous-tâches constitue le corps de tâche. La tâche possède un type de tâche, qui décrit la manière dont elle agence ses sous-tâches. Dans une approche simplifiée, MKSM propose quelques types de tâches, qui correspondent à une majorité des problèmes de modélisation rencontrés :

- La tâche de type séquence où l'ordre de description des sous-tâches donne l'ordre dans lequel elles seront exécutées.
- La tâche de type alternative où chaque sous-tâche est exécutée si la condition qui lui est associée est vérifiée. Une condition est donnée par une tâche de type condition qui produira une valeur vraie ou fausse (Booléen).
- La tâche de type itération. On donne avec ce type de tâche la possibilité d'exécuter une tâche autant de fois qu'il y a d'objets dans un tuple. On l'utilise en particulier pour indiquer que l'on veut appliquer un même traitement sur un groupe d'objets. Il n'y a donc qu'une seule sous-tâche générale, et deux champs particuliers qui indiquent quel est le groupe d'objets (ou tuple) sur lequel on veut itérer et quel est le paramètre d'itération.
- La tâche de type parallèle, qui exécute ses sous-tâches en parallèle.

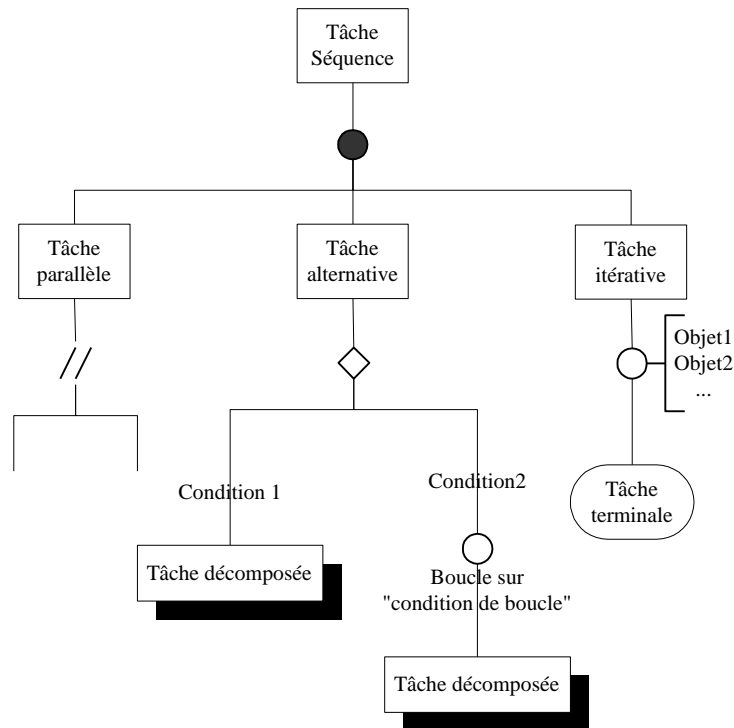


Figure 7.6. Le diagramme du modèle des tâches

7.3.6. Les modèles d'évolution

Introduction

Nous abordons ici une partie pas encore totalement stabilisée de la méthode MKSM, mais qui a fait l'objet de nombreuses expérimentations et réflexions, et qui est en voie d'affinement et de validation.

L'axiome de base de MKSM pour les modèles d'évolutions est de type "évolutionniste", connu des économistes comme l'hypothèse de "la dépendance du sentier" ("path dependency" [Coriat 97]) selon laquelle **c'est la nature même du patrimoine de connaissances accumulé dans une organisation qui prédétermine le sentier d'évolution de ces connaissances** (voire de l'organisation elle-même). Cet axiome n'est ni plus ni moins que celui de l'évolutionnisme pour les systèmes vivants (Lamarck et Darwin, ainsi que le concept de patrimoine génétique) repris pour les systèmes de connaissances. Il est loin d'être aussi évident qu'il y paraît de prime abord, et sa déclinaison sur les caractéristiques et les modalités de l'évolution des connaissances dans une entreprise sont complexes et multiples. Une théorie de l'évolution des systèmes de connaissances est actuellement à l'étude, qui devra déboucher sur une méthodologie opérationnelle complétant la méthode MKSM telle qu'elle est en l'état, complétant son axe "capitalisation" basé sur le macroscopie, par un axe "évolution" qui prendra en compte l'adaptation des organisations à leur environnement et la problématique de l'innovation (cf. [Barthelmé 98] [Ermine 99a] [Ermine 99b]).

Cette théorie de l'évolution des systèmes de connaissances est la base nécessaire pour justifier pleinement les modèles qui complètent le macroscopie. L'hypothèse de "la dépendance du sentier" demande à analyser l'évolution d'un système de connaissances vis à vis de son histoire pour mieux maîtriser son évolution future. C'est l'objectif des modèles d'évolution de MKSM. Ils ont pour but de décrire de manière structurée l'historique d'un ensemble de connaissances dans l'objectif est de mieux comprendre et maîtriser les lois d'évolution de ces connaissances, qui sont nécessairement spécifiques à l'organisation. Ces modèles s'inscrivent naturellement dans la structure du macroscopie.

Le premier modèle concerne le contexte de l'évolution. Les connaissances évoluent parce que leur contexte évolue, et que les grands concepts qui les sous-tendent évoluent. Le premier modèle retrace l'*historique*

général, l'histoire des idées. Le second modèle est une analyse a posteriori, une reconstruction raisonnée, compréhensible et synthétique des principaux objets ou concepts qui ont jalonné l'évolution du système de connaissances étudié. Ces concepts sont organisés en *lignées* qui suivent une ligne temporelle et où s'identifient le pourquoi et le comment de chaque évolution de concept. Les théories et les modèles présentés ici doivent beaucoup aux pionniers d'une nouvelle manière d'aborder l'histoire des techniques, héritée de l'histoire en général et de l'ethnologie, notamment Yves Deforge [Deforge 85]

Le modèle de l'historique

Pour présenter ce modèle, il suffit de citer Yves Deforge qui en fait un des trois outils fondamentaux pour l'étude de l'évolution des objets techniques : ce modèle « répond au désir de mieux connaître ce qui s'est passé à certains moments de l'évolution en reconstituant synthétiquement, autour d'un objet [d'un concept] le réseau des relations réciproques que l'objet entretient avec tous les sous-systèmes de systèmes plus vastes qu'on appelle [...] « système industriel » . [Ce modèle s'inspire de méthodes familières] à ceux qui étudient des phénomènes s'étendant sur de longues périodes : ethnologues, archéologues, économistes ; elles consistent, pour quelques époques significatives d'une évolution à recréer picturalement et dynamiquement le milieu associé au phénomène considéré ».

Il s'agit donc d'intégrer l'évolution d'une connaissance, d'un concept, d'un objet (en fait de la connaissance sur un objet, cf. Chapitre 3, § 3.4) dans un système contextuel qui est explicatif de cette évolution, et permet d'appréhender globalement les lignes directrices qui ont amené la connaissance à l'état perçu actuellement.

Dans le modèle proposé, le contexte historique est décrit par un petit nombre d'éléments qui apparaissent pertinents, au cours de l'analyse historique, pour décrire et englober le contexte d'évolution. Le contexte historique dépasse largement l'objet de connaissances proprement dit, qui se trouve ainsi mis en relation signifiante, d'un point de vue de l'évolution, avec d'autres sous-systèmes. Par exemple, d'une manière très générale, Yves Deforge propose de considérer les objets comme liés à quatre sous-systèmes, et de dégager donc dans ces systèmes les éléments pertinents : le système de production (« comment c'est fait ?, pourquoi c'est fait ainsi ? »), le système de consommation (système économique et social), le système d'utilisation (le couple utilisateur/objet, dans la dualité pour l'objet « objet d'usage »/« objet comme systèmes de signes ») et le système des objets (ce qu'on appellera avec lui les lignées, qui est le modèle suivant). Nous laisserons pour l'instant à l'analyste le soin de dégager ce que nous appellerons les éléments à prendre en compte dans l'évolution.

Ces éléments sont identifiés séparément, et leur disposition dans le temps est décrite succinctement, en nommant les grandes classes caractéristiques au cours du temps pour ces éléments. Ces classes peuvent être attachés à des objectifs qui peuvent avoir évolué dans le temps. Des liens d'évolution significatifs entre des classes ou des objectifs peuvent apparaître. Les repères temporels sont donnés par des jalons, qui sont des événements datés significatifs pour l'élément considéré, auxquels d'ailleurs peuvent être attachés des « archives ».

L'historique d'un concept, d'un objet, est caractérisé par des interactions entre tous les sous-systèmes impliqués dans cet historique et qui expliquent a posteriori les innovations, les découvertes, les améliorations, les adaptations etc. Dans le modèle proposé, ces interactions sont visualisées par des liens d'influence qui peuvent refléter des causalités multiples et variées.

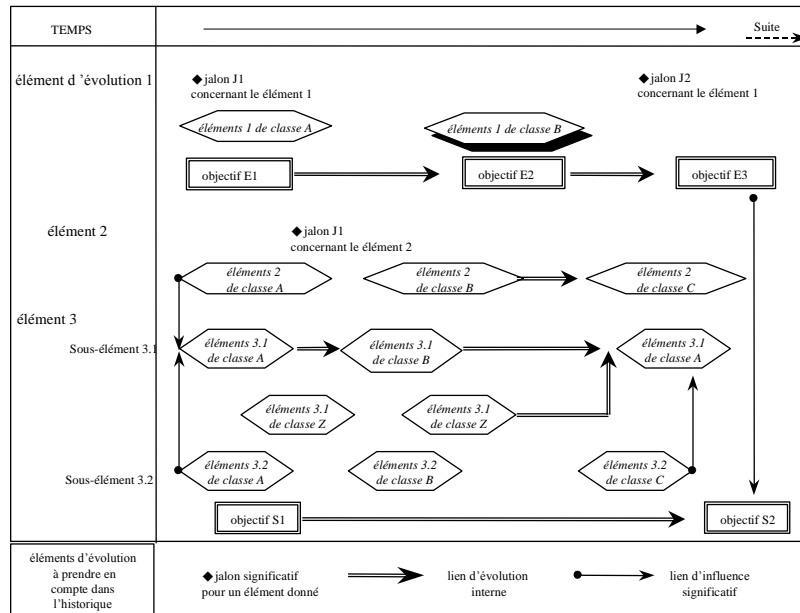


Figure 7.7 : Le diagramme du modèle de l'historique

L'ensemble de ces éléments est disposé dans un ou plusieurs tableaux synthétiques (Figure 7.7) qui ont été proposés par exemple dans [Jacomy.90]. On peut passer d'un tableau à l'autre en suivant l'échelle de temps ou en décomposant un élément (dessin ombré).

Le premier exemple (Figure 7.8) est un exemple construit à partir de l'analyse de Jacomy (qui est un disciple de Y. Deforge) sur le concept de noria dans l'antiquité, qui est un dispositif pour recueillir de l'eau à des fins d'irrigation. Dans son analyse, les éléments qui structurent l'évolution des norias sont les dispositifs pour la prise d'eau, la forme générale (noria à roue puis à chaîne) et le type d'énergie utilisée. Il note aussi que d'autres types de dispositifs ont influencé l'évolution des norias. Les jalons qu'ils proposent sont liés aux différents inventeurs qui ont fait évoluer le concept (et sur les quels ont a des archives).

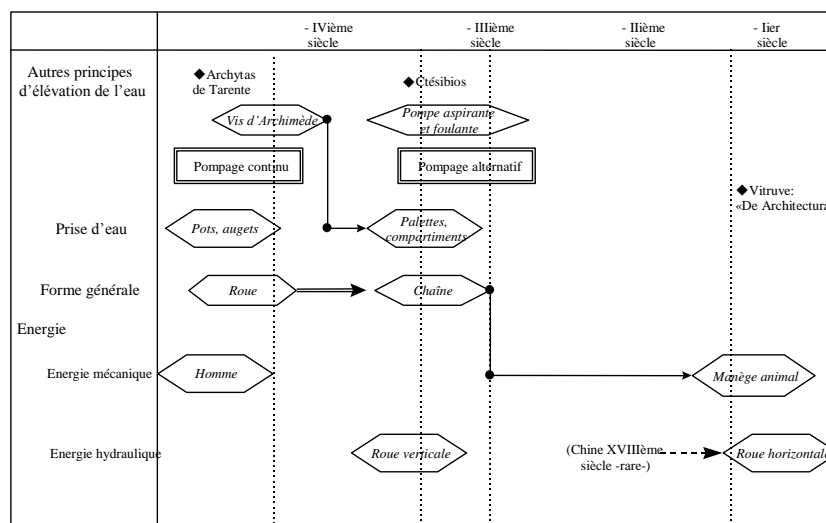


Figure 7.8 : L'historique (simplifié) des norias (d'après [Jacomy 90])

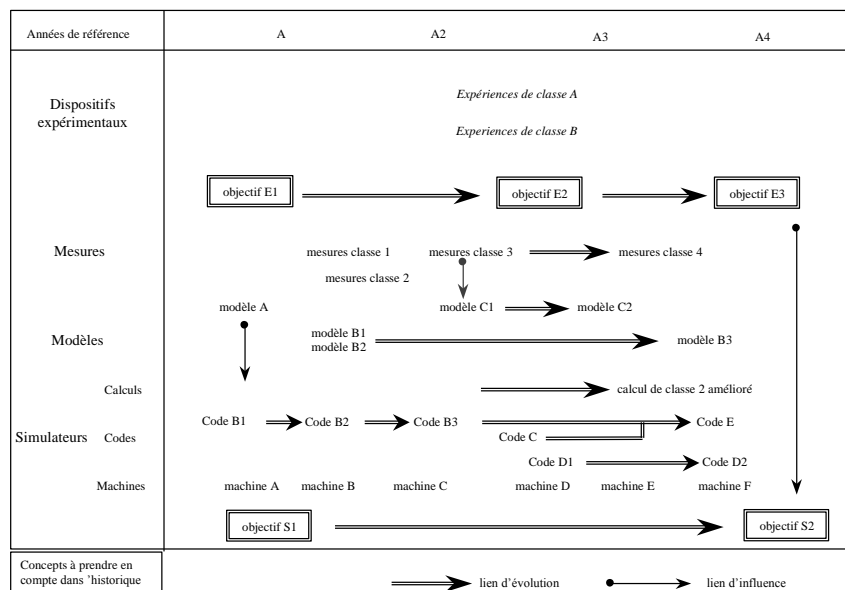


Figure 7.9 : L'historique de codes de simulation numérique

L'exemple de la figure 7.9 est tiré des travaux de Stéphane Picard qui a conçu et utilisé ce modèle pour la première fois [Picard 99]. La méthode MKSM a été adaptée aux systèmes de codes informatiques par S. Picard et appliquée, entre autres, à des codes de simulation numérique pour la Direction des Applications Militaires du CEA.

Cette méthode est une approche complémentaire aux activités de développement sur les codes déjà existantes. Elle a pour but de fournir aux utilisateurs et concepteurs des documents d'un type plus élaboré. Ces documents visent une description du logiciel selon différents niveaux de granularité (du code en général, jusqu'aux algorithmes particuliers), différents points de vue « métiers » (théoriciens, expérimentateurs, numériciens) et selon différentes échelles de temps pour appréhender l'évolution du code. Elle organise différents modèles pour décrire un patrimoine de connaissances lié à un système de codes. Ces modèles sont élaborés à partir soit de documents techniques, soit d'entretiens menés auprès de différents experts (physiciens, numériciens, informaticiens ou utilisateurs physiciens, dans le cas du CEA). Ils ont servi de référentiel de travail pour élaborer une structure documentaire (diagrammes, fiches, références aux documents techniques et aux publications scientifiques, etc.) qui est le livre de connaissances du système de codes. Ce livre contient un historique des codes, décrivant dans les grandes lignes l'évolution du système dans le temps, en fonction des évolutions des matériels, des techniques, des expérimentations, des objectifs etc. ainsi qu'un historique de la conception d'un code de calcul (cf. infra).

La figure 7.9 donne un exemple de modèle d'historique pour décrire le contexte d'évolution des systèmes de codes. Les dispositifs expérimentaux conçus et (ou) exploités au cours du temps rendent compte de la réalité physique. Les différentes mesures effectuées ont été interprétées à partir du type d'instrumentation mis en œuvre sur les dispositifs, et des modèles physiques pris en compte à cette période. En général, plusieurs modèles physiques sont considérés pour étudier des phénomènes physiques (ils constituent le modèle conceptuel au niveau du référentiel). Ces modèles sont mis en œuvre dans des codes de calcul et interviennent dans la compréhension des résultats expérimentaux. Par exemple, de nouveaux types d'instrumentation dans les dispositifs peuvent amener à reconsidérer l'emploi d'un modèle utilisé dans les codes de calcul et à effectuer des modifications au niveau de ce modèle (sur la figure, les mesures de type 3 ont entraîné une évolution du modèle physique C). De même, l'augmentation de la puissance de calcul des machines, permettent de mettre en œuvre différemment certains modèles physiques (par exemple, les modèles B1 et B2 ont été remplacés par le modèle B3). Les éléments pris en compte comprennent les codes de calcul, les machines sur lesquelles ils sont exploités, et les types de calculs qui sont réalisés à partir des codes. L'acquisition de nouvelles machines permettent de développer et d'exploiter des codes de calculs plus puissants et mettent en œuvre de nouveaux modèles physiques (par exemple, différentes versions du code B se succèdent, puis ce code et le code C sont remplacés par un nouveau code: le code E).

Le modèle des lignées

Le modèle de l'historique permet de maîtriser le contexte dans lequel s'est déroulé l'évolution du système de connaissances. Le modèle suivant s'attache aux objets et/ou aux concepts autour desquels s'est bâti le système de connaissances. Il en propose une lecture temporelle générale, reconstruite à partir d'une analyse a posteriori et qui a pour but de donner une image mentale (cognitive) pertinente des évolutions des objets/concepts principaux du système, avec une argumentation raisonnée. Il s'agit d'un outil a posteriori de compréhension qu'on appelle la lignée. C'est un outil bâti et utilisé dans les théories qui fondent l'histoire des techniques ou des technologies des groupes humains (A.Leroi-Gourhan, J.Baudrillard, A.Moles, G.Simondon, cf. une synthèse de ces références dans [Deforge 85]). Il s'adapte ici assez bien au contexte de l'évolution des connaissances en général.

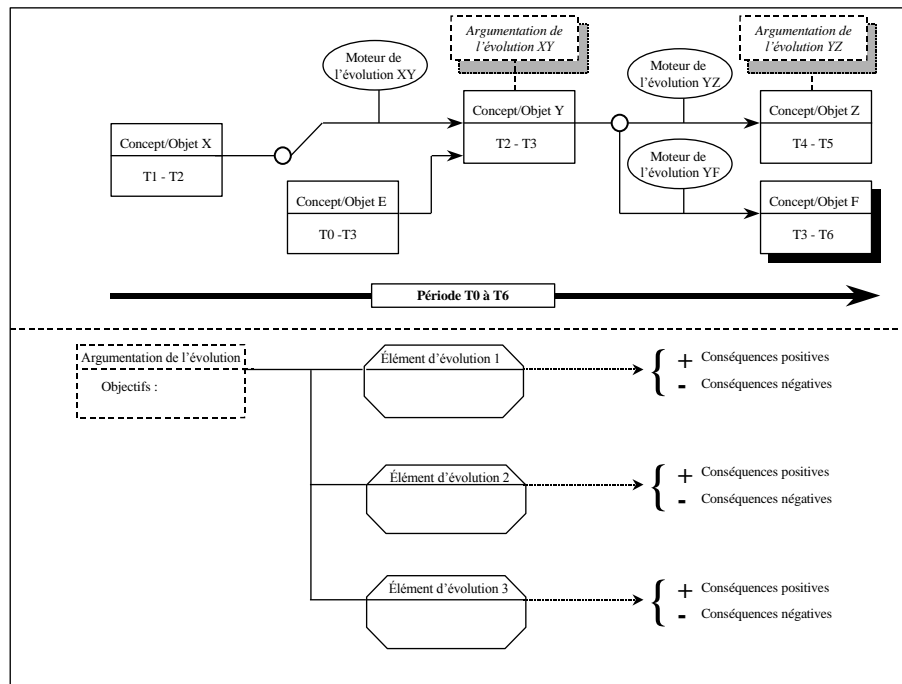


Figure 7.10 : Les diagrammes du modèle des lignées

Un ensemble de lignées décrit des successions dans le temps de concepts ou d'objets dans un ordre évolutif « dont on dit généralement qu'il va dans le sens du progrès, par des améliorations ou perfectionnement successifs » ([Deforge 85]), décrivant ainsi des « tendances lourdes » ou des « lois d'évolutions » qui pour l'instant doivent être prises dans un sens assez vague. Les éléments de la lignée sont des générations d'objets ou de concepts (des « espèces » dirait-on en terme évolutionniste), caractéristiques d'une période donnée qu'on perçoit comme présentant une unité conceptuelle dans le temps, permettant de nommer ces générations. Dans le domaine des objets techniques (selon A. Leroi-Gourhan ou Y. Deforge), la lignée est constituée par le rangement chronologique présentant la même fonction d'usage, et le mettant en œuvre le même « principe » (défini comme le principal phénomène physico-chimique mis en jeu dans l'objet, mais qui en fait devient vite difficile à cerner dans les objets complexes, où l'on parle de solutions technologiques et de formes). Les lignées sont semblables aux lignées de la biologie, Y. Deforge parle d'évolution d'une lignée, de sélection naturelle, de fin de race, tératologie et aberrations, de lignées interrompues, résurgences, mutations, de croisement de point nodal et de bifurcation. Il s'agit donc bien d'une théorie de l'évolution qui est mise en œuvre. Les lignées sont organisées dans un arbre généalogique qui retrace les apparitions et éventuellement les disparitions des lignées les unes par rapports aux autres.

Comme chez les évolutionnistes en biologie, les arbres généalogiques (ou classifications génétiques, objet d'une science propre appelée la « cladistique »), sont des reconstructions a posteriori raisonnées. Les systèmes de connaissances, obéissant à une finalité identifiée (comme tout produit industriel), il est possible de retracer les raisons et les leçons de l'évolution dans les lignées. C'est une démarche semblable à la démarche de « Design Rationale » dans certains domaines de la conception, qui cherche à tracer les raisons d'un choix qui a amené une évolution significative dans un produit [Moran 96]. C'est pourquoi le modèle des lignées comporte un certain

nombre d'arguments qui fournit des justificatifs de l'évolution des connaissances. Dans une lignée, le passage d'une génération à l'autre est toujours expliqué par la présence d'un moteur de l'évolution qui a permis ou facilité le passage d'une génération à l'autre. Chaque nouvelle génération peut être argumentée en décrivant les éléments positifs (ou favorables) qui lui sont attachés par rapport à l'ancienne génération ou par rapport à l'acquisition de nouvelles connaissances, mais aussi les éléments négatifs (ou défavorables) qui sont apparus et qui souvent d'ailleurs, ont été un facteur d'évolution pour passer à une génération suivante. Cette argumentation est regroupée selon les éléments d'évolution qui ont été, le plus souvent, identifiés dans le modèle de l'historique. Chaque génération peut être aussi caractérisée par son objectif, puisque l'évolution des connaissances est finalisée.

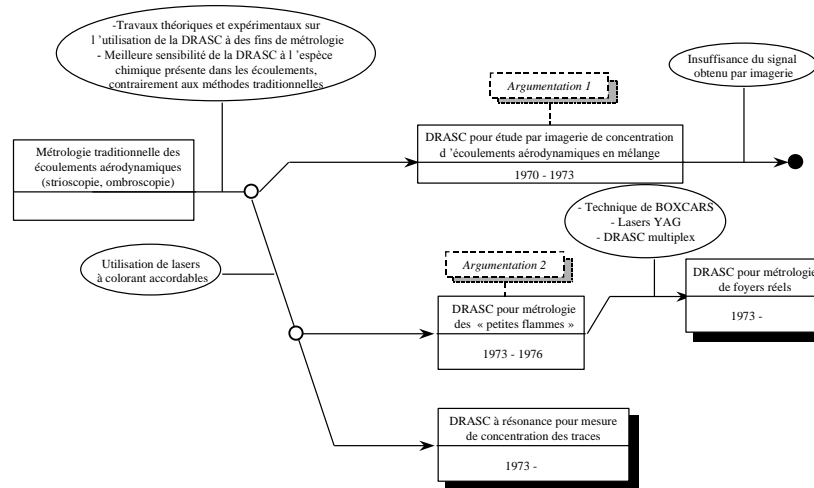


Figure 7.11 : L'exemple de lignées dans une technologie laser

Le modèle des lignées est donné dans la figure 7.10, les deux figures suivantes sont une illustration sur une technologie laser (DRASC : Diffusion Raman Anti Stokes Cohérente) extraite d'une étude faite à l'ONERA (Office National des Etudes et Recherches Aérospatiales). La Diffusion Anti-Stokes Cohérente (DRASC) est un phénomène physique à la base d'une méthode de mesure de température et de concentration gazeuse utilisée à l'Onera depuis une trentaine d'année. Cette méthode consiste à irradier l'échantillon à étudier par un mélange de deux ondes laser dont les fréquences diffèrent d'une valeur égale à la fréquence de vibration du gaz à analyser. L'analyse et la mesure de l'intensité du faisceau produit par l'effet Raman Anti-Stokes Cohérent renseigne sur la température de l'échantillon et sur sa concentration gazeuse.

Les deux modèles présentés en 7.11 et 7.12 décrivent l'évolution des différentes technologies utilisées. Ainsi le passage de la métrologie traditionnelle à la métrologie optique a été possible par des études théoriques et expérimentales sur la DRASC et par l'apparition des lasers à colorants accordables.

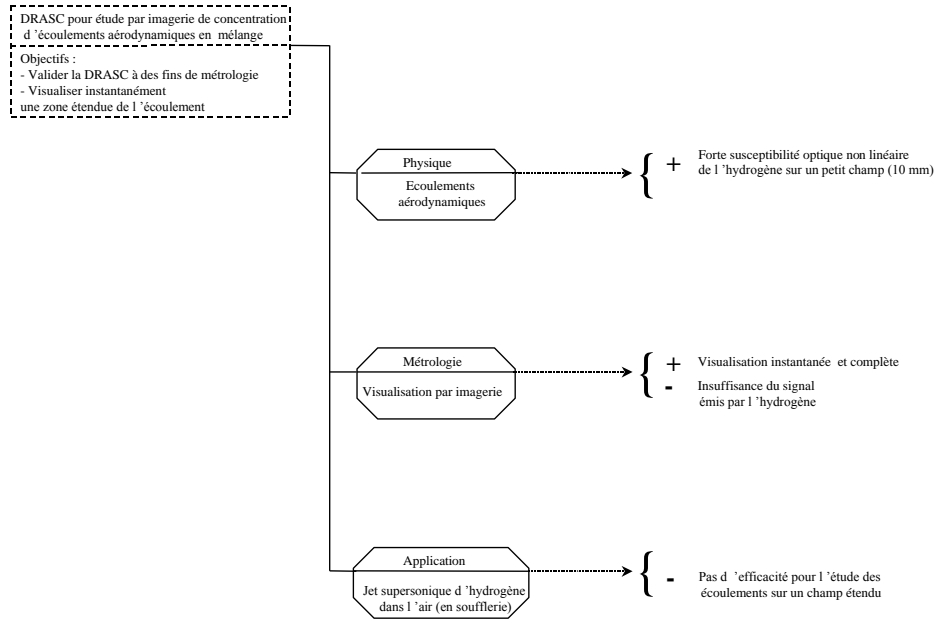


Figure 7.12 : Argumentation sur une génération de la lignée

Les lois d'évolutions

Pour compléter les modèles d'évolution décrits ci-dessous, il faudrait confirmer et se donner des outils pour étudier des « lois d'évolutions » qui donnent un sens aux lignées et qui gouvernent la production de nouvelles connaissances. Pour des objets techniques « on peut énoncer des lois telles que celles de l'évolution vers le simple, vers le concret, vers l'auto-suffisance, mais on peut (et on doit) aussi rattacher ces « lois d'évolutions » à la psychologie profonde, constante et de tous les temps, du concepteur et du consommateur » ([Deforge 85]) replaçant ainsi l'objet ou le système de connaissances dans un système social qui l'a produit et dont on ne peut le dissocier.

L'objectif de découvrir les lois d'évolution, par la construction et l'analyse des modèles de l'historique et des lignées est de comprendre les raisons profondes qui ont fait évoluer les connaissances dans une organisation, et de dégager ainsi les lignes de force qui ont permis à l'organisation de produire des innovations (au sens large du terme). Selon la théorie de la dépendance du sentier, ces lois sont donc des leviers pour piloter la création de nouvelles connaissances et ainsi accélérer l'innovation au sein de l'organisation.

7.4. Un exemple d'analyse de connaissances

Pour donner une idée d'une analyse d'un système de connaissances avec MKSM, nous avons choisi un exemple que tout le monde peut appréhender et compléter à loisir, c'est celui d'une recette de cuisine. Nous avons retenu celle des pâtes pâtisseries, inspiré du livre de cuisine " La cuisine de Maguelonne ". Ce livre, qui est un classique de la cuisine, est un véritable Livre de Connaissances au sens de MKSM. Si la méthode MKSM peut s'appliquer à ce corpus de connaissance, il faut appliquer à la description de la recette qui est donnée les principes du microscope et retrouver les modèles décrits dans le chapitre précédent. Il s'agit donc de dégager le point de vue information (données et traitements), le point de vue du sens (modèle des concepts et modèle des tâches), et le point de vue du contexte (modèle d'activité et modèle du domaine). Les modèles d'évolution ne sont pas utilisés dans cet exemple (il en existe cependant une ébauche dans le livre même !).

7.4.1. L'information

Pour décrire une recette de pâte pâtisserie en termes d'informations, on peut dans un premier temps constituer une base de données sur toutes les informations nécessaires et suffisantes pour réaliser la pâte.

Voici une idée de ce que cela pourrait être :

DONNEES :

Données sur les ingrédients :

Farine :

Quantité disponible (Kg)

Fournisseurs

Œufs :

Quantité disponible (Entier)

Date de ponte (jj/mm/aa)

Fournisseurs

Lait :

Quantité disponible (l)

Type (écrémé, semi-écrémé, cru.)

Fournisseurs

Etc.

Données sur les instruments :

Four :

Température de fonctionnement (°C)

Temps de préchauffage (mn)

Largeur (cm)

Etc.

Données sur la réalisation :

Tarte :

Temps de cuisson (mn)

Quantité de farine (g)

Nombre d'œufs (Entier)

Etc.

TRAITEMENTS :

Gestion des stocks :

Si La quantité de farine est $< n$ kg

Alors

Choisir un fournisseur

et Passer la commande

Tant que La commande n'est pas honorée

Relancer le fournisseur

Enregistrer la quantité de farine rentrée

Etc.

Procédure de conduite du four :

Mettre le four en marche

Dès que le temps de préchauffage est fini

Laisser pendant le temps de cuisson donné

à la température de fonctionnement du four

Etc.

Réalisation de la tarte :

Mélanger la quantité de farine au nombre d'oeufs

Ajouter la quantité de lait

Etc.

On peut remarquer que, d'une manière intuitive, certaines données contiennent, du savoir-faire, comme par exemple la largeur du four, qui est une donnée issue d'un retour d'expérience (!), et non d'une connaissance propre à la recette.

Toutes les données nécessaires et suffisantes à la réalisation de la recette peuvent être ainsi transcrites. Ce n'est pas pour autant qu'on a capitalisé la connaissance ou le savoir-faire associé. Les autres points de vue du microscope de la connaissance vont être abordés maintenant.

7.4.2. Le sens

Le sens est décrit comme une représentation cognitive de l'expert, ici le cuisinier ou la cuisinière, qui donne " substance " (on dit donc donner du sens) aux informations qui ont pu être identifiées ci-dessus. En terme structurel, le sens se décrit comme une structure classificatoire qui organise et définit les concepts que manipule l'expert.. Dans cet exemple, il s'agit d'une connaissance classificatoire du domaine de la fabrication des pâtes pâtisseries, qui est aisément reconnaissable dans le livre de cuisine, et modélisable avec le modèle des concepts de MKSM. C'est la figure 7.13.

En terme fonctionnel, le sens se décrit comme une représentation de la tâche que se construit l'expert quand il accumule du savoir-faire et de l'expérience dans l'exercice de son activité. Cette représentation est personnelle. Dans une recette de cuisine, elle se traduit par un ensemble très cohérent de tours de main, d'astuces qui sont décrits dans le livre de cuisine. Dans MKSM, on capte cette connaissance experte grâce au modèle des tâches . La figure 7.14 montre un tel modèle, qui n'est ici qu'une retranscription formelle du texte du livre. On remarquera qu'il est impossible de traduire un tel modèle de tâche en algorithme ou procédure du fait d'un grand nombre d'imprécisions, de conseils non prescriptifs, et de la limite dite de la " connaissance tacite " (le concept " d'eau à peine salée " est énoncé mais non défini et doit être reconstruit tacitement par l'apprenant dans l'expérience !).

7.4.3. Le contexte

Le contexte décrit les grands principes de base, les grands traits dans lesquels s'inscrit le domaine de la connaissance considérée. En terme fonctionnel, il s'agit simplement d'une analyse d'activité, qui décrit, selon un principe hiérarchique et un formalisme de type SADT, les principales activités qui décomposent le déroulement

de l'action de base (du " métier ") concernée par le domaine. Dans l'exemple de la recette, c'est par exemple l'activité de réalisation de la pâte (Figure 7.15). On pourra noter les références de type hyperliens aux autres types de connaissances décrites dans d'autres modèles ou sources d'information.

L'aspect structurel est la description des bases théoriques du domaine de la connaissance, mais vues sous un aspect " métier ". Dans l'exemple de la recette de cuisine, ils décrivent les phénomènes fondamentaux qu'il faut comprendre pour bien réussir une pâte. Par exemple, on peut lire dans le livre de cuisine : " pour la pâte brisée, la technique du pétrissage fait que les particules de la farine enrobées de gras restent suffisamment imperméables à la vapeur d'eau dégagée par la cuisson. Cette vapeur cherchant à s'échapper pousse la pâte qui se dilate un peu, juste assez pour rester fine et croustillante ". Dans MKSM, ce type de connaissance se capte par le modèle du domaine, illustré en figure 7.16 (il est sans doute moins poétique que le texte ci-dessus, mais plus standard !).

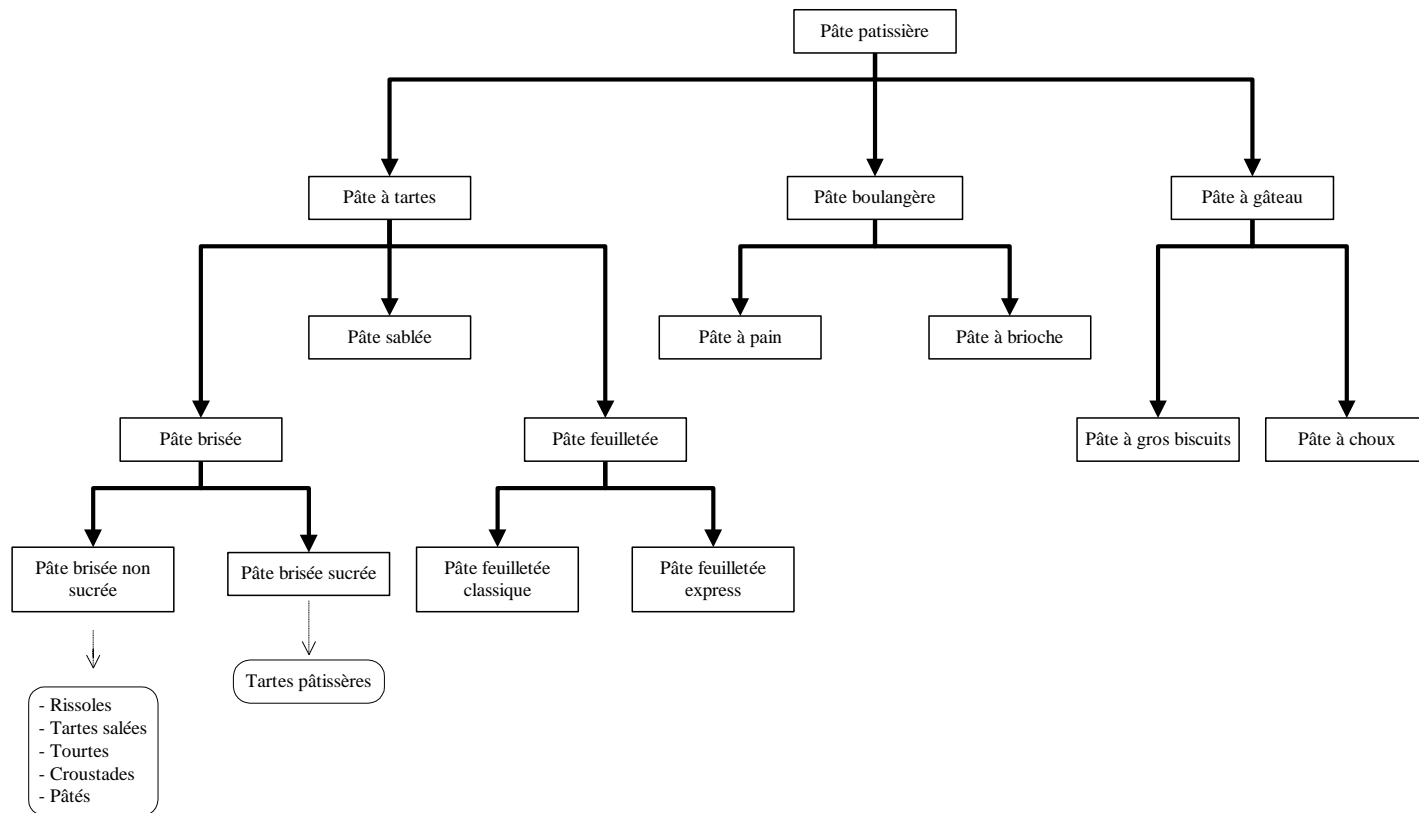


Figure 7.13 : Le modèle des concepts

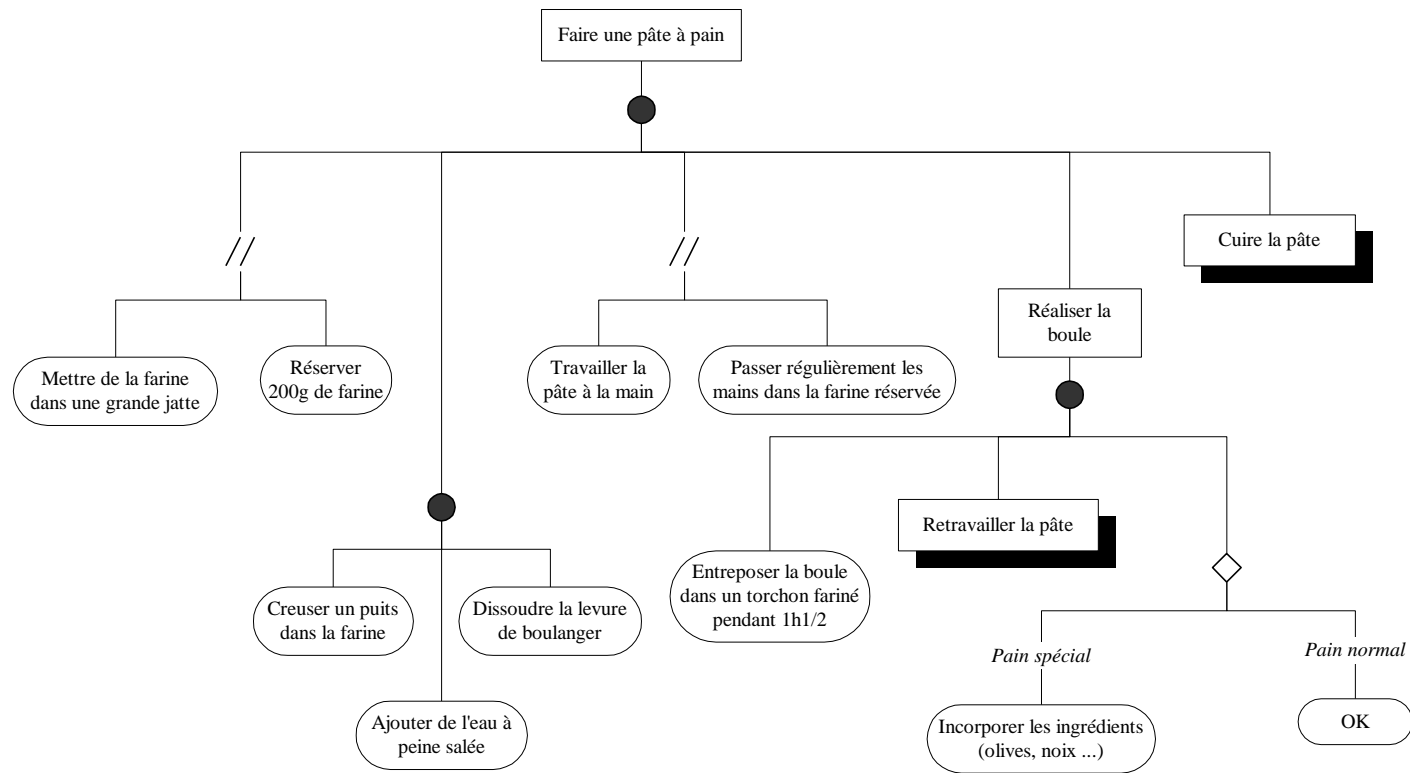


Figure 7.14 : Le modèle des tâches

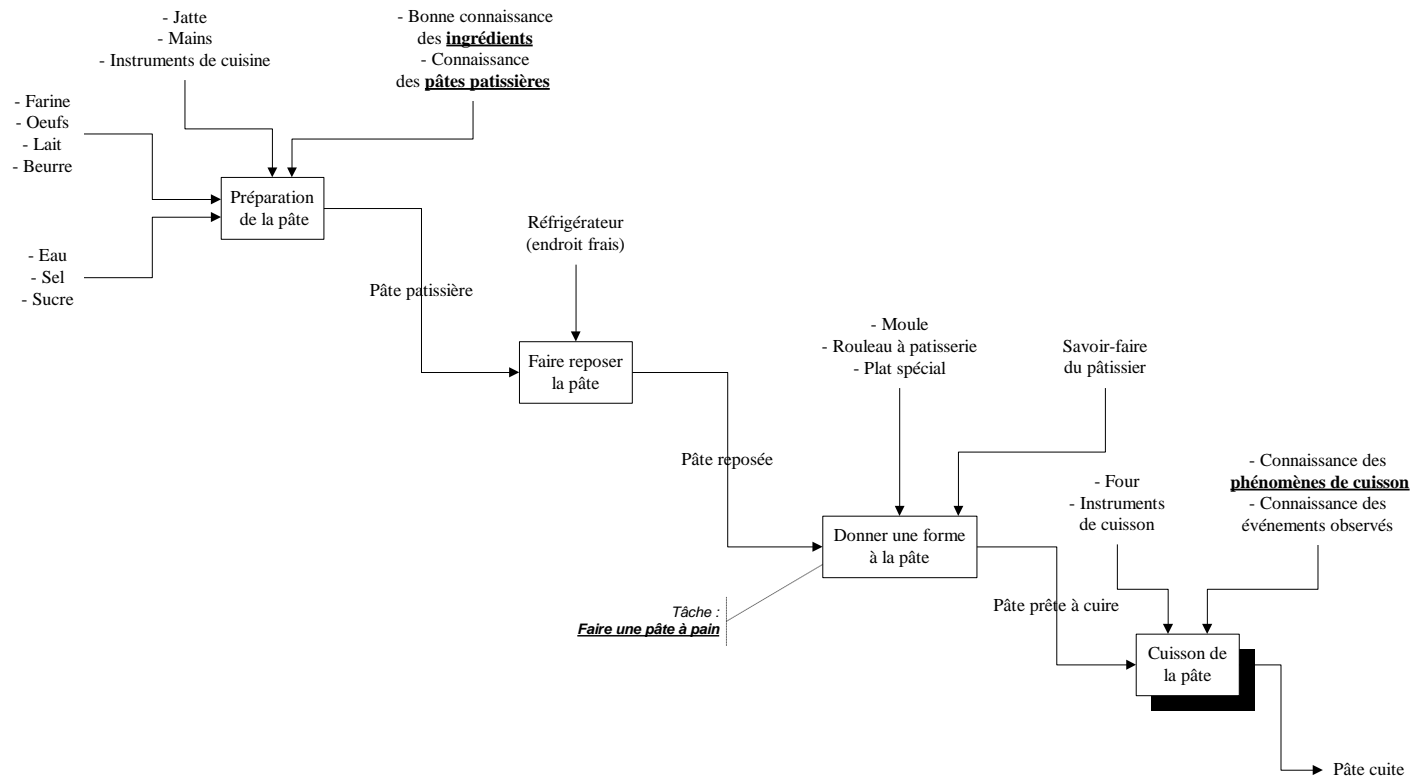


Figure 7.15 : Le modèle d'activité

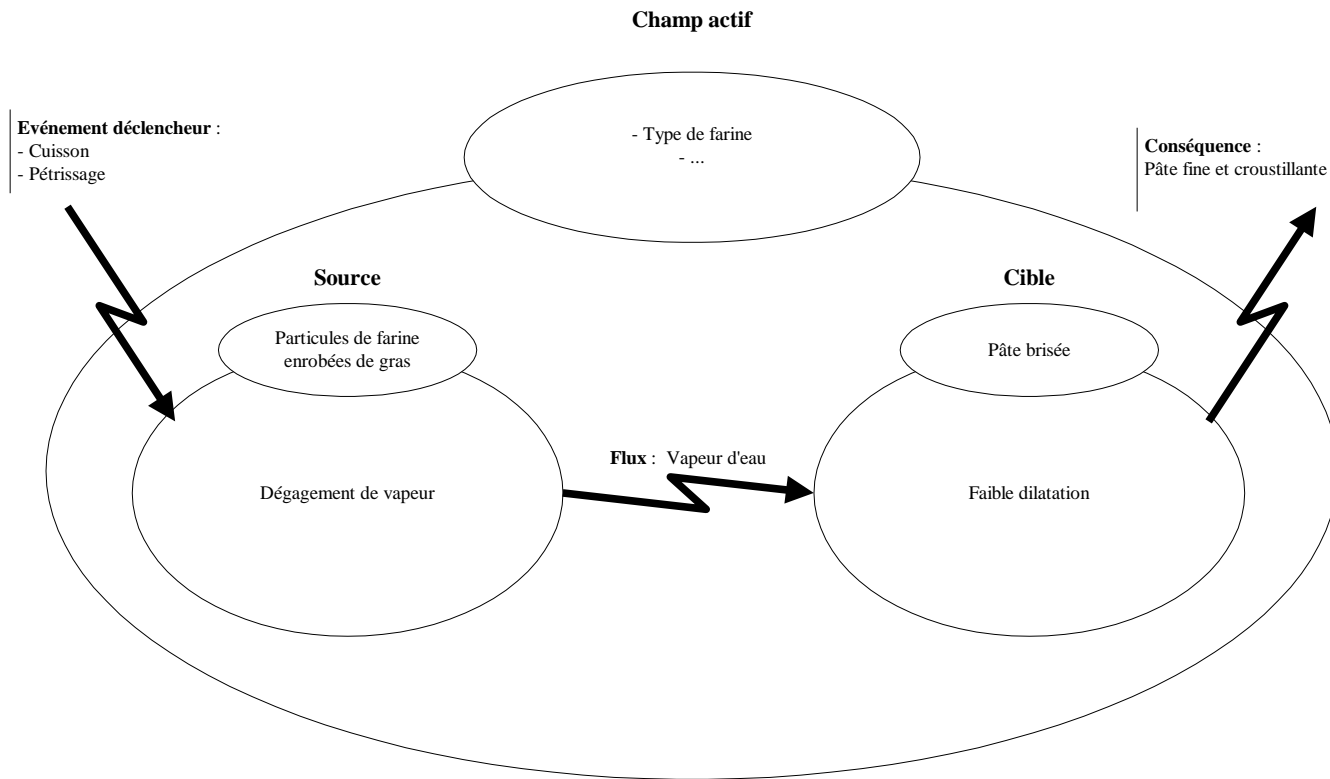


Figure 7.16 : Le modèle du domaine

7.6. Le cycle de vie de MKSM

7.6.1. Conduite d'un projet MKSM

Les phases qui ont été détaillées ci-dessus constituent le cœur de la méthode MKSM. Elles font partie de ce qu'on peut appeler le cycle de modélisation. Elles ont pour but d'aider à maîtriser la complexité d'un système de connaissances dans les points de vue contextuels et sémantiques définis par le microscope de la connaissance. Le point de vue informationnel n'est pas abordé ici. Il concerne, dans l'optique de l'ingénierie d'un système de connaissances, le génie logiciel. Les méthodes de génie logiciel définissent également un certain nombre de modèles qui permettent de maîtriser la complexité d'un système logiciel de traitement de l'information. Ces modèles ne sont pas toujours disjoints des modèles qui ont été définis ci-dessus, car ils cherchent (souvent sans le dire explicitement) à atteindre des points de vue pragmatiques ou sémantiques. Ils sont cependant très orientés vers la réalisation de systèmes de traitement de l'information, et arrivent donc rarement à dépasser réellement ce point de vue. Le cycle de modélisation de MKSM peut donc être avantageusement complété par le cycle de modélisation d'une méthode de génie logiciel comme UML ou MERISE.

Un projet MKSM est donc organisé autour du cycle de modélisation. Il induit ainsi le cycle de vie d'un projet MKSM. Cependant, un cycle de vie étant à vocation opérationnelle, il ne saurait avoir pour objectif la simple construction des modèles. Il faut donc définir des étapes qui articulent les phases de modélisation et orientent celles-ci selon un projet. La première étape nécessaire est la phase de cadrage. Celle-ci permet d'identifier le sous-ensemble du patrimoine de connaissances à analyser, de définir a priori les modélisations nécessaires et de choisir un projet pilote qui permettra de dimensionner par la suite le déploiement du projet sur tout le sous ensemble. Le projet pilote correspond à la stratégie du "steady organic growth", (qu'on pourrait traduire par la « stratégie du nénuphar » en français !) où il est important de valider l'approche sur un échantillon petit mais significatif, pour mobiliser sur le projet, valider ses apports et ses limites, et définir la forme particulière à l'application spécifique en cours. Les étapes suivantes sont les phases de modélisation du projet pilote. Vient ensuite la constitution du premier livre de connaissances, qui est soumis à validation, à relecture puis est assujéti à l'obtention d'un consensus par un certain nombre d'acteurs. C'est ensuite que vient la phase de déploiement, après la mise en œuvre des décisions et des moyens nécessaires.

7.6.2. La phase de cadrage

Le nombre de modèles à construire représente un effort considérable. Les projets de gestion de connaissances, tels qu'on peut les rencontrer sont de nature très diverse, tant par leur domaine d'application recherché (assurance qualité, documentation, logiciel, organisation etc.), que par leur niveau d'approche (stratégique, opérationnel...) ou leur sujet d'étude. Le cycle de modélisation complet n'est donc pas perçu comme nécessaire par les acteurs : un sujet d'étude à caractère peu scientifique ne nécessite pas en général la construction du modèle du domaine, une approche générale de la gestion des connaissances d'un domaine ne s'intéresse pas en général aux modèles détaillés des concepts et des tâches etc.

Pour chaque projet, il est donc nécessaire de définir, outre son objectif en termes stratégique ou tactique, les phases de modélisation qui seront utiles à l'objectif. C'est l'objet de la phase de cadrage. Par exemple, un projet visant à répertorier les compétences sur un domaine sera plus intéressé par le modèle du système de connaissances et le modèle d'activité. Un projet visant à capitaliser le savoir dans un domaine sera plus intéressé par le modèle du domaine, un projet de capitalisation d'une expertise particulière utilisera les modèles de tâches et de concepts etc. La phase de cadrage permet également d'identifier et mettre en place les acteurs : comité de pilotage qui suit et oriente, comité de projet qui réalise, comité technique qui conseille. Même pour un projet pilote, il est intéressant de se doter d'un embryon d'organisation de ce type. Un déploiement à une échelle plus vaste nécessite en effet une organisation particulière qu'il est intéressant de tester (on pourra voir plus de détails dans [Besse 99]).

La figure 7.17 résume la phase de cadrage dans un diagramme d'activité MKSM.

7.6.3. Les phases de modélisation

Les phases de modélisation sont au centre de MKSM. Elles s'effectuent sur la base de sources de connaissances identifiées. Il s'agit en général d'experts, ou de documentation (avec des "lecteurs spécialisés"). Elles comportent une phase de recueil sous forme d'entrevues ou d'interprétation de documentation. Cette phase

est toujours guidée par les diagrammes du modèle, et fonctionne grâce à l'interaction de personnes du domaine et de personnes extérieures, au fait des modèles. Vient ensuite une phase d'écriture et de mise en qualité des modèles, qui se fait grâce à des outils spécifiques. Chaque modèle est restitué dans un " classeur " contenant bien sûr les diagrammes et diverses informations ou documents rattachés. Ces modèles font ensuite l'objet d'une revue avec l'ensemble de ceux qui les ont élaborés.

La figure 7.18 résume une phase de modélisation dans MKSM

L'ensemble des modèles construits est ensuite rassemblé et recomposé dans un document qu'on appelle le *Livre de Connaissances* du domaine. Ce livre de connaissances, dont il a été question au début de cet article, rassemble, outre les modèles, des fiches, des documents de base, des illustrations (des films pour des versions multimédia), des pointeurs vers des sources d'information dont l'ensemble, rassemblé et compilé, fournit une vision synthétique et structurée du domaine de connaissances concerné, telle une véritable encyclopédie métier.

Le Livre de Connaissances (dont la structure générique est donnée sous forme de diagramme de classe de type UML dans la figure 7.19) est l'aboutissement d'un projet MKSM, le premier livrable. Mais il est le point de départ du vrai projet de gestion des connaissances, dont le minimum consiste à faire partager et évoluer ce livre au sein de l'entreprise. Il peut ensuite être la base pour la construction de projets très divers, informatisés ou pas (outil d'aide à la décision, d'aide à la conduite, formation etc.).

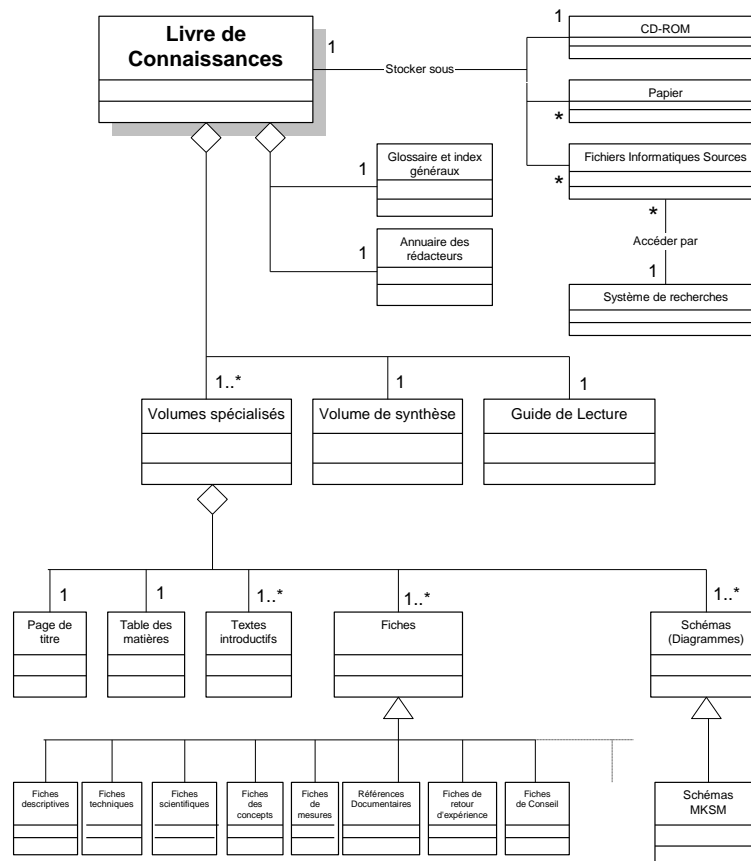


Figure 7.19 : Structure générique d'un livre de connaissances

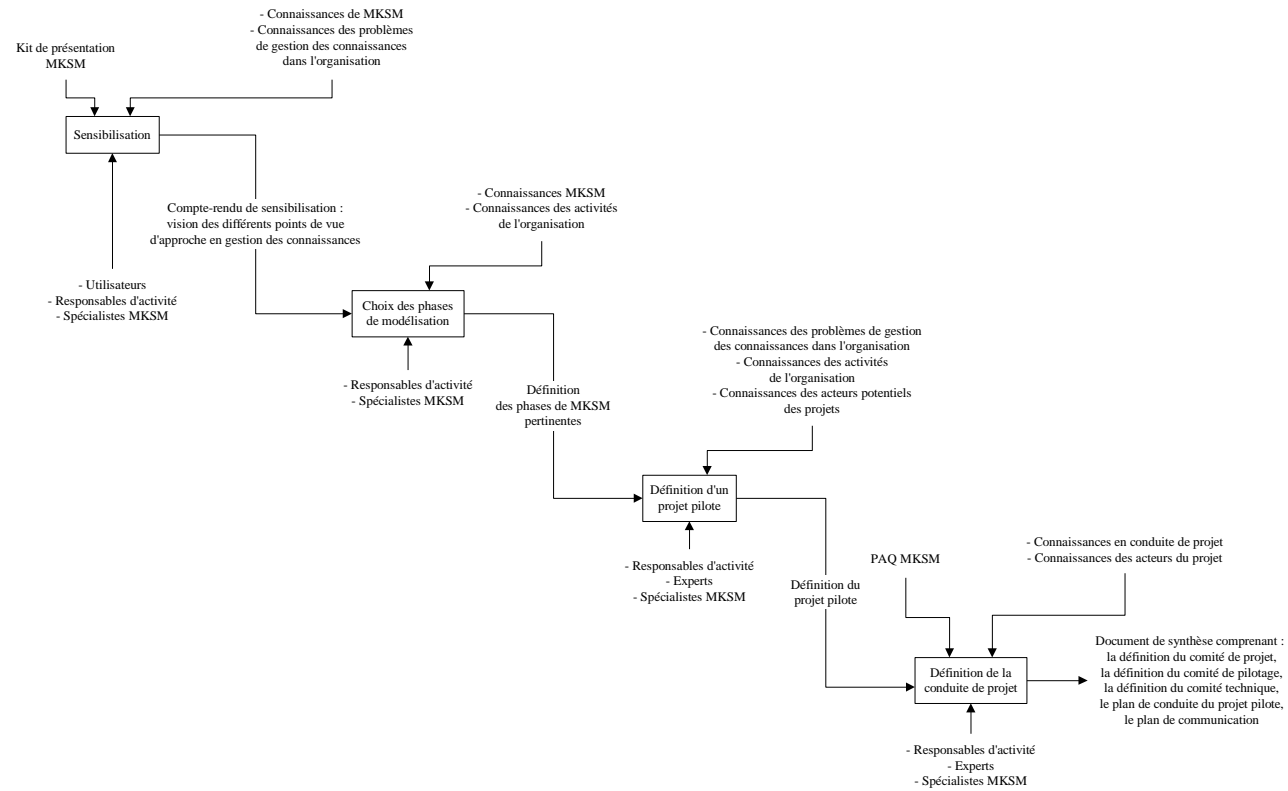


Figure 7.17 : La phase de cadrage

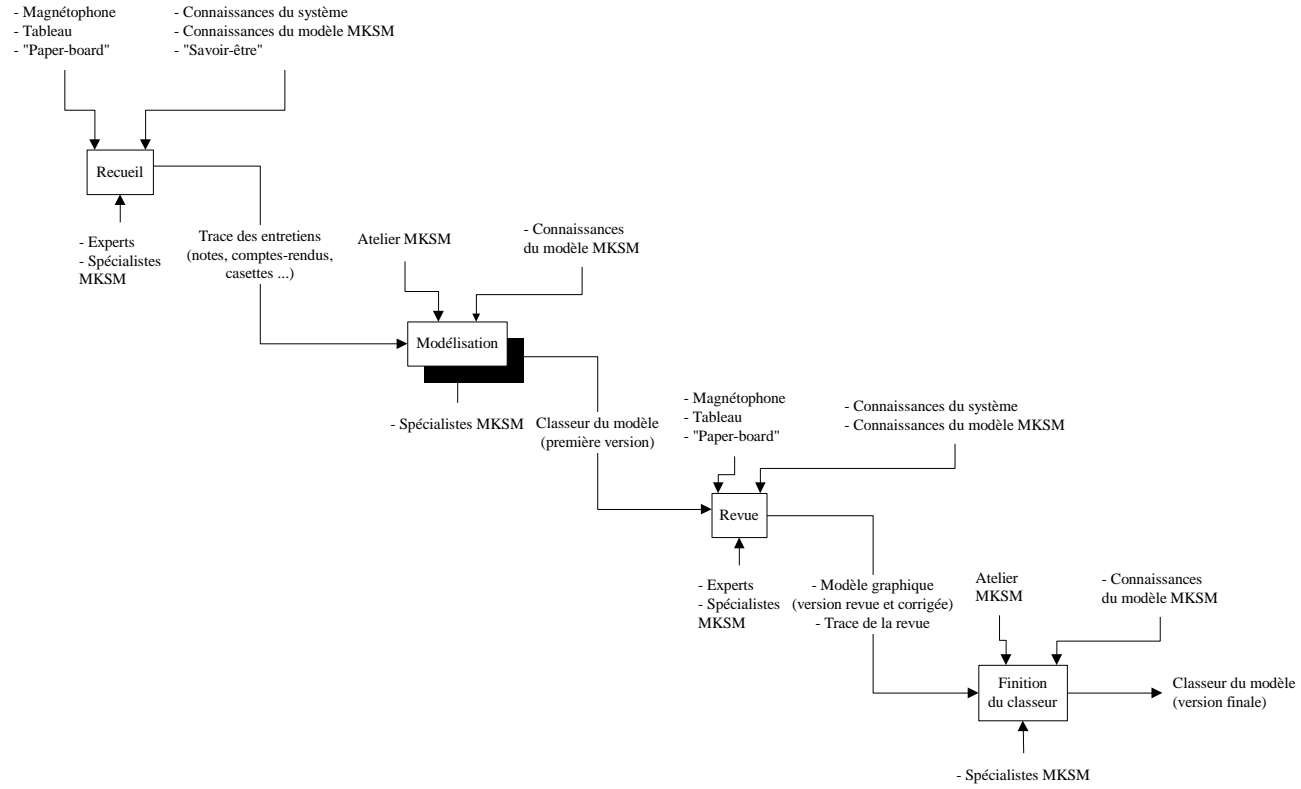


Figure 7.18 : Une phase de modélisation

7.6.4. L'organisation d'un projet MKSM

Un projet MKSM demande une organisation quelque peu particulière par rapport à un projet classique. Pour la réalisation, il y a deux rôles d'acteurs essentiels : les détenteurs de la connaissance (experts) bien sûr, qui fournissent le savoir à faire partager, et les "rédacteurs/cogniticiens" (on pourrait parler de "maïeuticiens") qui permettent l'expression structurée de ce savoir. Pour la conduite du projet et sa validation, il y a également deux rôles essentiels : celui du comité de pilotage, qui veille au bon fonctionnement et valide le déroulement, et celui du comité de lecture qui valide le contenu.

La structure organisationnelle

L'organisation structurée d'un projet de livre de connaissances est décrite en détail dans [Besse99]. La figure 7.20 (diagramme de collaboration UML) fournit les rôles et les collaborations, et, par exemple, ceux centrés sur les experts qui détiennent les connaissances :

- Les unités détentrices de la connaissance désignent les services experts .
- Les unités de conseil fournissent aux experts la méthodologie rédactionnelle (modèles MKSM) pour rédiger le livre.
- Les experts rédigent les aspects scientifiques, savoir-faire etc. des fiches et des diagrammes du livre de connaissances, les travaux sont donnés aux équipes de réalisation du livre qui ont la charge de rédiger (mise en forme, finalisation, etc.) le livre. Les experts peuvent compléter leurs travaux à la suite d'omissions et valident les rédactions de mise en forme et de finalisation effectuées par les équipes de rédaction.
- Afin de rédiger le livre de connaissances, les équipes de rédaction collaborent avec les experts, sur la base d'interviews et de travail en équipe. Lorsque les experts valident les travaux rédactionnels, si un problème est détecté en relecture (omission, modification, etc.), les experts donnent à l'équipe de rédaction les modifications à joindre aux fiches et diagrammes du livre.

Dans ce diagramme, on peut effectivement remarquer que l'équipe de réalisation a un rôle très logistique, qui ne se réduit cependant pas au simple rôle de rédacteur. Cette équipe de réalisation est en communication active avec les experts des différents domaines, c'est un acteur très important dans la coconstruction des modèles et de la structure du livre de connaissances. Un projet de livre de connaissances est caractérisé fortement par ce caractère de coconstruction qui résulte de l'interaction complexe entre une équipe de réalisation et un grand nombre de personnes détentrices de la connaissance (les experts). La véritable équipe de réalisation est en fait la juxtaposition de ces deux entités coopérantes : l'équipe de réalisation et l'équipe des experts. Comme il a été dit, il en est de même pour le pilotage du projet. Le comité de pilotage a aussi un rôle logistique, et il travaille en étroite collab

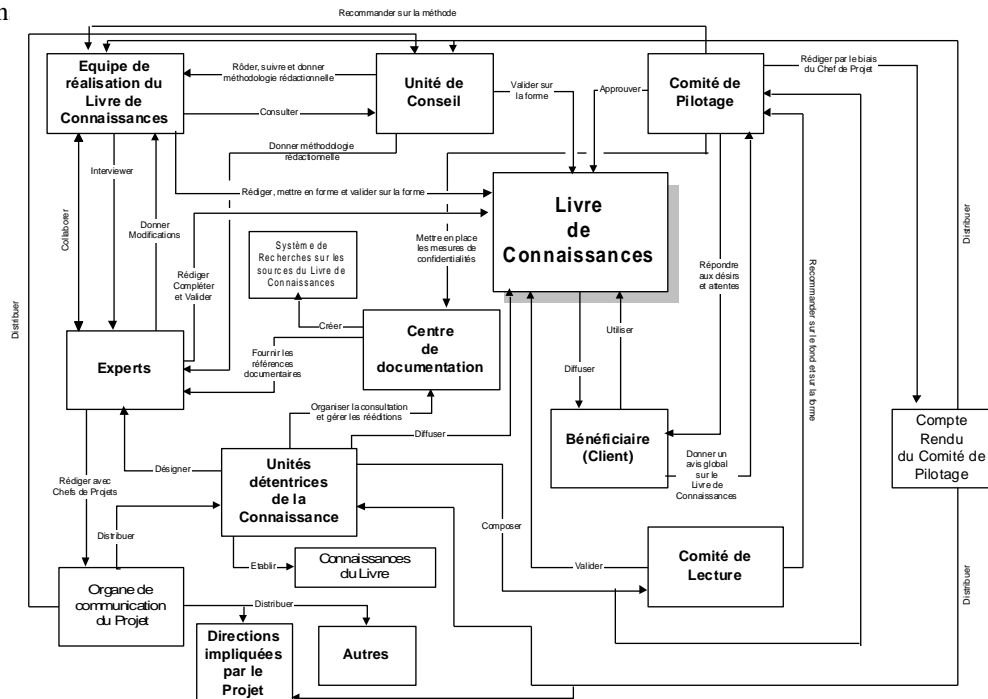


Figure 7.20 : Diagrammes de collaboration dans un projet MKSM

Les activités

La réalisation d'un projet de livre de connaissances est régie par certaines pratiques et procédures (cf. encore [Besse99]). La démarche est progressive. Des documents de travail (les classeurs) sont élaborés successivement par l'ingénieur de la connaissance (IC), qui interviewe des experts, vérifie et corrige avec chacun d'eux. L'ensemble des documents de travail ainsi recueilli est mis en forme sous une première ébauche du livre de connaissances, avec l'aide de personnes qui peuvent avoir une vue d'ensemble du domaine de connaissance (documentalistes, responsables ...), avec un premier souci d'ergonomie. Puis cette ébauche est mise en discussion avec tous les experts auteurs, pour obtenir un consensus sur l'ensemble de la connaissance recueillie. C'est cette version consensuelle qui est soumise à la validation par un comité d'experts (pour le contenu) et un comité de projet (pour les objectifs). Le livre est ensuite mis en partage auprès des acteurs susceptibles de l'utiliser et de le faire évoluer. C'est alors que commence la phase d'évolution du livre.

La démarche de réalisation d'un livre de connaissances est résumée dans la figure 7.21. Elle a été modélisée avec l'aide des étudiants du laboratoire Tech-CICO de l'UTT (Université Technologique de Troyes)

L'évolution d'un livre de connaissances obéit à des procédures similaires à celles qui sont en vigueur dans les milieux scientifiques, et qui ont fait preuve de leur robustesse, au vu de l'avancement pertinent (même s'il est parfois chaotique !) du patrimoine de connaissances scientifiques mondial ! Ce genre de procédure n'est cependant pas commun dans les milieux industriels et de service.

C'est une procédure de soumission à un comité des pairs, avec également une validation par des administrateurs du livre. Chaque phase de cette procédure peut donner lieu à un rebouclage sur une phase précédente. Pour des raisons de lisibilité, le schéma de la figure 7.22 qui résume cette démarche n'indique pas tous ces retours possibles.

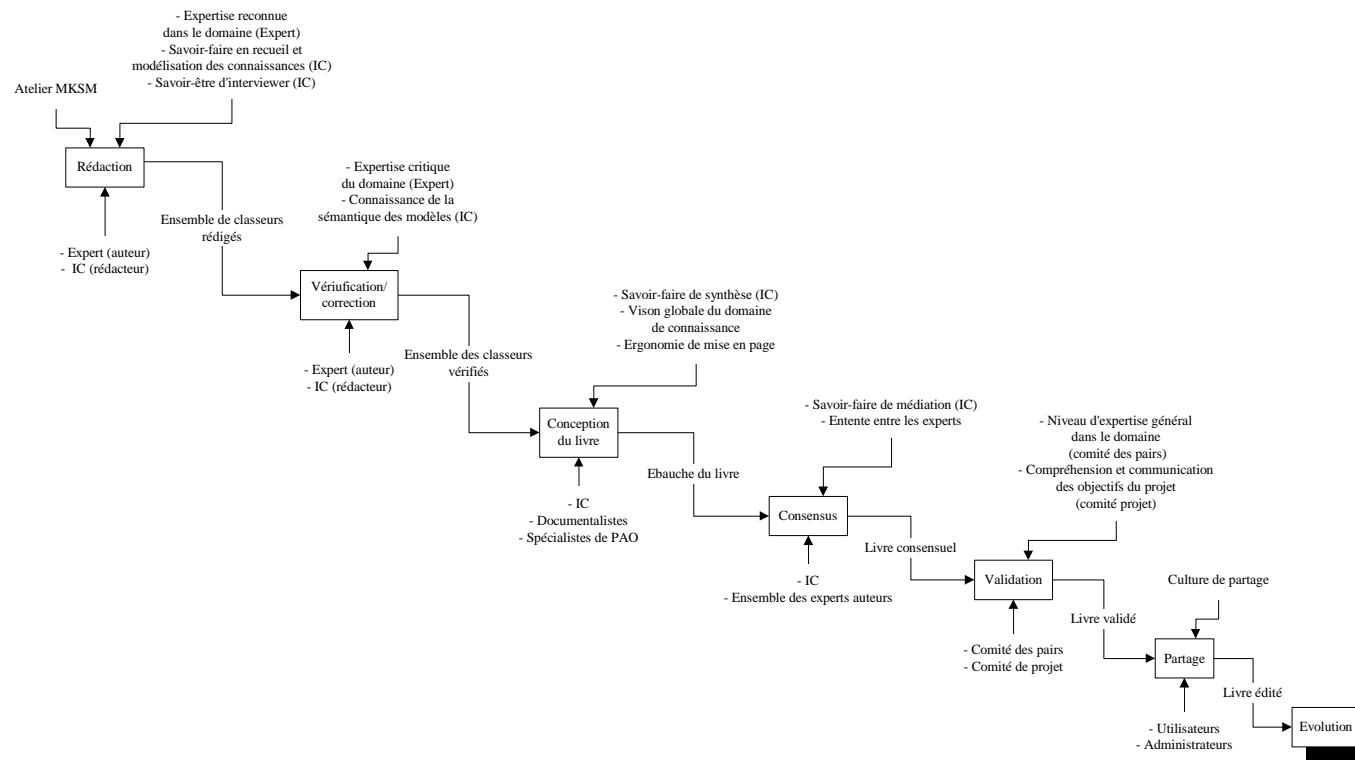
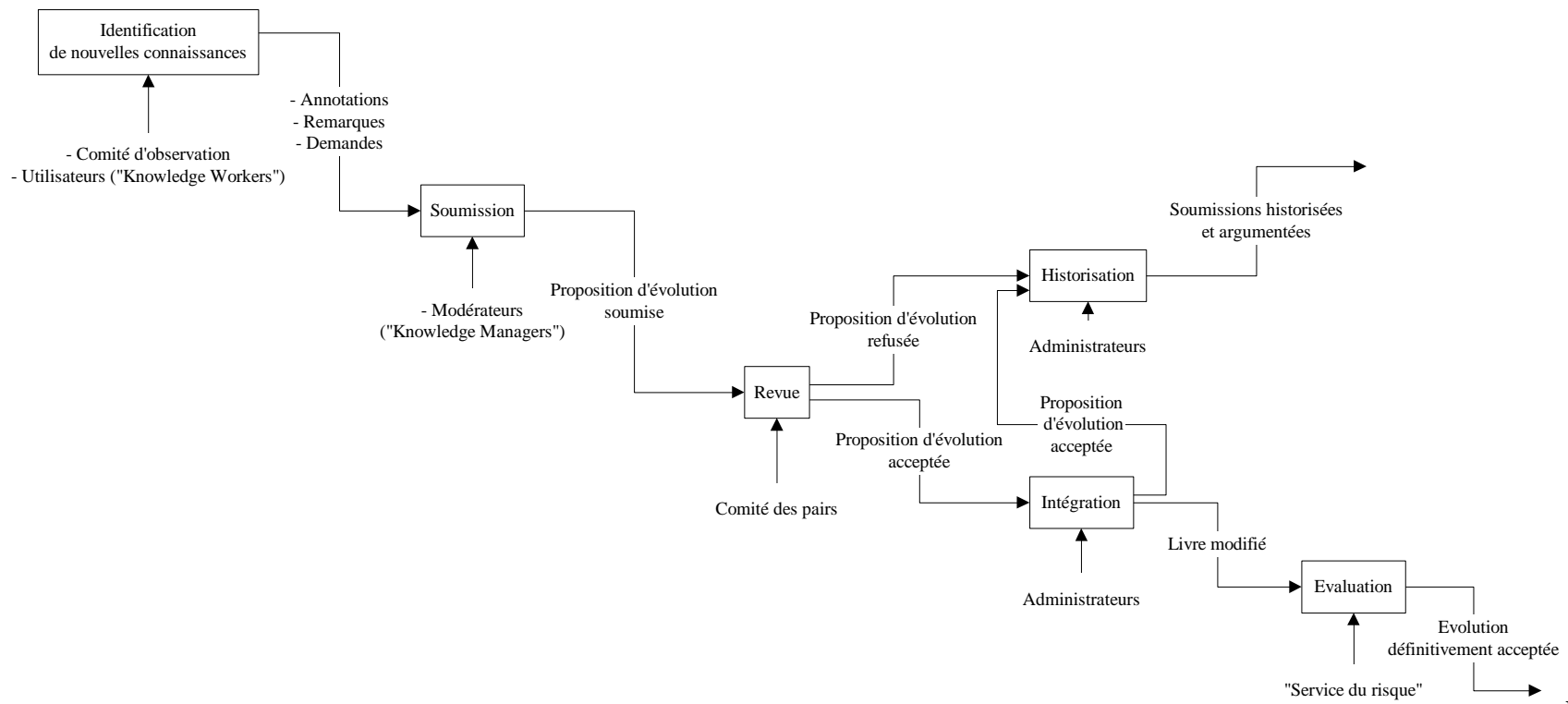


Figure 7.21 : Démarche pour l'édition d'un livre de connaissances



Figure

7.22 : Démarche pour l'évolution d'un livre de connaissances

7.7. La démarche d'accompagnement

Un projet MKSM, qui cherche à capitaliser une partie de la connaissance d'une entreprise, ne peut pas être une action isolée et ponctuelle. Tout au plus, peut-il être une action pilote, prélude à un déploiement plus vaste. Si la gestion des connaissances est, comme nous le défendons, un élément de management stratégique, MKSM s'inscrit comme une brique dans une démarche globale.

Cette démarche s'initie par une réflexion et une analyse stratégique du capital de connaissances de l'entreprise (cf. §1). Elle se prolonge par une démarche tactique qui doit aboutir à la mise en place d'actions opérationnelles. Cette démarche tactique comporte trois volets :

- Un schéma directeur, ou un schéma d'orientation (ou encore un référentiel) pour la gestion des connaissances qui délimite le champ de travail des actions de gestion des connaissances.
- Une méthode d'analyse de ces corpus de connaissances, pour les mettre en visibilité (c'est MKSM).
- Une démarche d'accompagnement du changement, qui garantit l'adhésion et la participation des acteurs, sans lesquelles tout projet est voué à l'échec.

7.1. Le schéma directeur de gestion des connaissances

Celui-ci a pour but de répondre aux questions suivantes : Quels sont les domaines de connaissances critiques pour l'entreprise, sur lesquels doivent porter les efforts ? Quel est le réseau du savoir porteur de ces connaissances ?

Les critères de criticité pour déterminer l'importance stratégique d'un corpus de connaissances peuvent être divers, et très dépendant de la culture et de la situation de l'entreprise. Une telle évaluation peut être faite à partir des critères d'évaluation économique cités au § 1, ou à partir de l'analyse des processus de l'entreprise (le "Business Model"). Une ébauche de schéma d'orientation de ce type avait été proposée pour MKSM dans [Ermine 96b], mais elle n'a pas été suffisamment validée encore pour s'intégrer dans une démarche très opérationnelle. Des recherches sont en cours sur ce sujet.

L'identification du "réseau du savoir", porteur des connaissances critiques, et qui sera mobilisé en premier lieu dans un projet MKSM, ne pose en général pas de problèmes. Il y a une reconnaissance assez courante, parfois explicité, souvent tacite, des contributeurs essentiels au savoir ou savoir-faire de l'entreprise. Il reste à formaliser cette identification, sachant qu'elle concerne souvent une partie assez réduite du personnel de l'entreprise.

7.2. L'accompagnement du changement

Un projet de gestion des connaissances est par nature porteur de changement dans l'organisation. C'est un projet fortement imprégné de la culture propre de l'entreprise, et négliger cet aspect est un facteur d'échec assez fort. Il faut donc préparer, avec un tel projet, une démarche d'accompagnement et de communication très structurée.

Pour un projet MKSM, le changement se manifeste par trois étapes :

- 1) L'étape dite "du miroir" (en référence au "stade du miroir" de Lacan!). Le premier changement qui s'opère à la suite des entretiens avec les détenteurs de la connaissance s'effectue sur eux-mêmes. En effet, la structuration des connaissances d'un expert est, si elle est bien menée, une opération très "restructurante". Les personnes ont, en général, une conscience morcelée des connaissances qu'elles détiennent. La participation à la rédaction d'un livre de connaissances permet de leur restituer une image globale et structurée de manière qu'ils reconnaissent pertinente, valorisée et valorisante, de ces connaissances. C'est l'objectif de la coconstruction des modèles. Cette première étape permet au "réseau du savoir" participant de devenir porteur du projet.
- 2) L'étape de l'obtention du consensus. La connaissance recueillie ne peut pas être l'objet de validation au sens classique, car il s'agit d'une connaissance personnelle et/ou collective qui est très particulière à l'entreprise, au plus haut niveau, et pour laquelle il n'existe jamais de modèle externe de référence. La seule validation possible, à l'instar de la communauté scientifique par exemple, est l'obtention d'un consensus par un comité des pairs, en général constitué par d'autres acteurs du réseau

du savoir ou des acteurs connexes. Le consensus n'est pas une donnée naturelle, surtout dans l'entreprise. Il demande donc une attention particulière quant à son obtention. Il peut se faire à plusieurs niveaux (suivant les accointances avec les experts qui ont participé notamment). Le consensus doit être avalisé formellement par le réseau hiérarchique.

3) L'étape de mise en partage. Il est clair qu'un recueil de connaissances n'a d'intérêt que s'il y a une appropriation et une évolution de ces connaissances dans l'entreprise. Ceci ne peut se faire que si la connaissance est partagée par les personnes concernées au sein de l'organisation. Les technologies de l'information sont un moyen puissant de mise en partage, mais ce n'est pas une condition suffisante. Une communication et des procédures adéquates sont nécessaires. Cette étape est essentielle pour réaliser le "cycle vertueux" de la connaissance qui est résumé dans la figure 7.23, qui reprend le cycle célèbre de Nonaka sur les transformations des connaissances tacites et explicites [Nonaka 95]

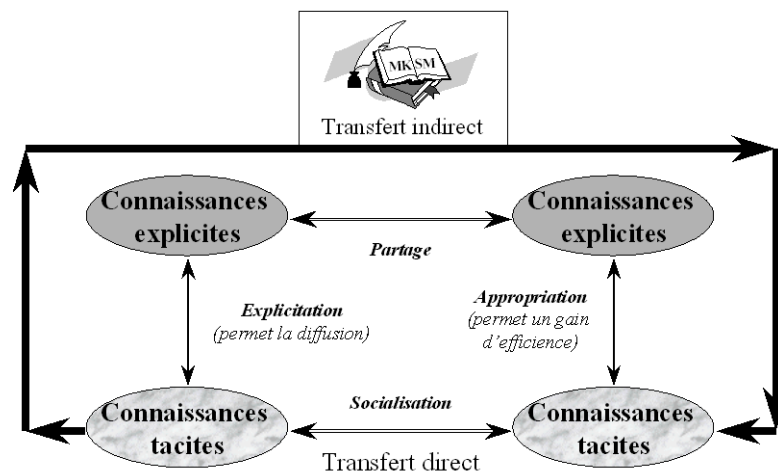


Figure 7.23 : Le cycle vertueux du processus de capitalisation et partage avec MKSM

7.8. Conclusion et perspectives

La gestion du patrimoine de connaissances est maintenant une donnée fondamentale dans le management des entreprises. Elle doit s'effectuer en trois phases successives, en commençant par l'élaboration d'objectifs stratégiques, puis par une approche tactique afin de déterminer et d'analyser les connaissances critiques pour l'entreprise, et enfin par la mise en place de projets opérationnels, pouvant utiliser fortement les technologies de l'information. La méthode MKSM, située au niveau tactique, est une méthode d'analyse des systèmes de connaissances, qui essaie de maîtriser la complexité inhérente à cette problématique par des modélisations successives, à différents niveaux de granularité. Son objectif est d'arriver à avoir une visibilité correcte sur les connaissances à gérer afin de donner du contenu pertinent aux projets qui peuvent se mettre en place. Elle se fonde sur des éléments théoriques fournis en particulier par la systémique et la sémiotique. Elle bénéficie du retour d'expérience de nombreux projets opérationnels.

MKSM est une méthode d'ingénierie des connaissances, qui mobilise les acteurs de la connaissance (le réseau du savoir) par une activité de recueil par interviews, et restitue en partage une vision formalisée d'un corpus de connaissances, pouvant structurer un corpus d'informations.

La connaissance capitalisée grâce à MKSM ne vaut que si elle devient un facteur de productivité important pour l'entreprise. Elle doit donc évoluer, s'adapter et fournir des bases pour l'innovation et la créativité. C'est le sens des évolutions futures de la méthode. Le problème de l'évolution des systèmes de connaissances est

crucial et non trivial, nous l'avons évoqué déjà. Il n'est pas neuf non plus, puisque de nombreuses théories ont été déjà élaborées (cf. par ex [Deforge 85]) sur ce thème. Ce problème se décompose en sous-problèmes :

Gérer l'évolution interne du Patrimoine

Capitaliser l'évolution passée du patrimoine de connaissances : ("Savoir d'où l'on vient pour mieux savoir où l'on va")

C'est l'objectif des modèles d'évolution évoqués au § 3.6

Organiser l'évolution future du patrimoine de connaissances

Pour cela on peut s'appuyer sur l'hypothèse qu'il existe un système de pilotage de l'évolution, qui a une organisation, des pratiques et des procédures. Par ailleurs, il existe une communauté qui a des pratiques validées de longue date pour reconnaître, approuver et diffuser des connaissances novatrices, voire révolutionnaires, c'est la communauté scientifique. Les pratiques de gestion de l'évolution peuvent donc être utilement inspirées de ces dernières, c'est ce qui a été esquissé dans le § 6.4.

Gérer l'évolution du Patrimoine par son interaction avec l'environnement

Il existe de manière évidente des fonctions endogènes de création de connaissances, mais celles-ci ne peuvent s'exercer pleinement qu'en s'enrichissant des informations qui peuvent être recueillies dans l'environnement externe de l'entreprise. C'est l'objet des structures d'intelligence économique et commerciale, de veille technologique, stratégique, scientifique et technique etc. que mettent en place les organisations. Bien sûr, ces structures ne sont productives que si elles contribuent à l'évolution du patrimoine de connaissances de l'organisation. Il s'agit donc d'intégrer des processus de capitalisation de type MKSM à des processus de surveillance et d'interaction avec l'environnement pour obtenir une efficacité maximum. C'est l'objet de nouvelles recherches sur MKSM (cf. [Benhamou 00]).

Créer, Innover

C'est l'objectif ultime. La créativité et l'innovation forment tout un champ de réflexion intégrant de nombreuses disciplines (essentiellement des sciences humaines). La relation de ce champ avec la gestion des connaissances est encore mal définie et mal connue. Elle est cependant essentielle, si l'on veut atteindre les objectifs stratégiques cités au début. On peut citer deux pistes qui permettent de supporter les processus d'innovation en liaison avec la gestion des connaissances :

- 1) La capitalisation des historiques, des lignées de solutions dans le temps permet de matérialiser les processus d'innovation qui ont déjà eu lieu dans l'entreprise. On part ainsi du fait "qu'on a déjà innové, donc on le peut encore".
- 2) La découverte de lois d'évolution générales qui peuvent orienter les mécanismes d'innovation.

Les processus de gestion d'un patrimoine de connaissances

Un système de connaissances dans une entreprise est un système complexe, régi par des processus encore mal identifiés. La gestion opérationnelle des connaissances est la gestion de ces processus. Ceux-ci sont au nombre de quatre (figure 7.24) :

- Le processus de capitalisation et de partage des connaissances. C'est essentiellement celui qui est supporté par la méthode MKSM qui vient d'être décrite ici. Ce processus est celui de la figure 7.23.
- Le processus d'interaction avec l'environnement. C'est le processus de veille ou d'intelligence économique ou stratégique. Il est modélisé dans [Ermine 99a] et [Benhamou 00], en liaison avec le processus ci-dessus.
- Le processus d'apprentissage et de création de connaissances. C'est un processus endogène qui est à la base de l'évolution. Il est encore très mal connu.
- Le processus de sélection par l'environnement. C'est un processus évolutionniste par excellence, de sélection des connaissances créées par des critères de marché, d'acceptabilité etc., à la fois économiques et socio-techniques. Nous ne l'évoquerons pas plus avant ici.

Les recherches en cours permettront à terme de définir un ensemble de méthodes et d'outils cohérents pour gérer ces processus et atteindre ainsi pleinement l'objectif de la gestion des connaissances.

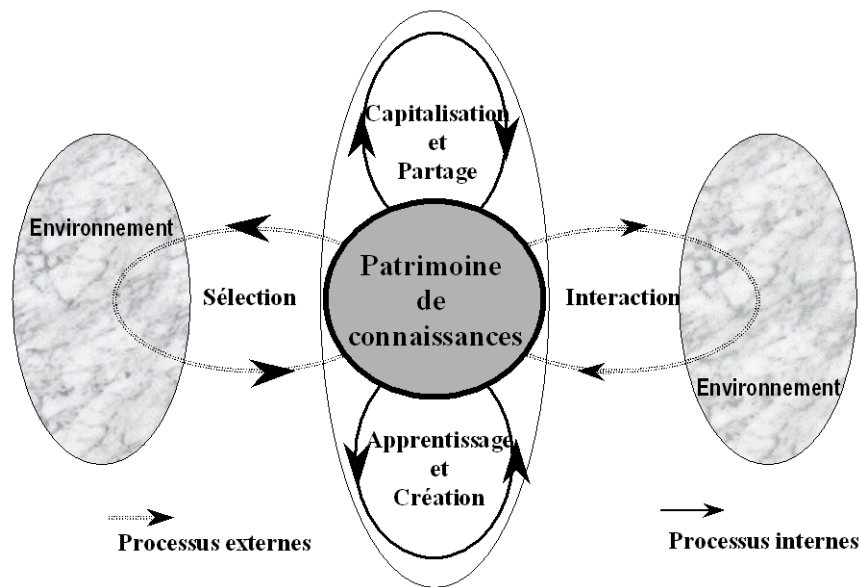


Figure 7.24 : Les processus de gestion d'un patrimoine de connaissances (Modèle de la marguerite)

7.9. Bibliographie

Références

- [Barthelmé 98] F. Barthelmé, J-L Ermine, C. Rosenthal-Sabroux : *An architecture for knowledge evolution in organisations*, European Journal of Operational Research, 109, 414-427, 1998
- [Benhamou 00] P. Benhamou , , J-L Ermine, , T. Tounkara, C. Rosenthal-Sabroux : *Une méthode intégrant Gestion des Connaissances et Veille*, Actes du congrès IC'2000, Ingénierie des Connaissances 2000, Toulouse, France, 10-12 mai 2000
- [Besse 99] A. Besse, J L Ermine, C. Rosenthal-Sabroux : *Modelling Organisation, Practices and Procedures for Knowledge Books Design*, PAKeM'99, Practical Application of Knowledge Management, Londres, 23-27 avril 1999, pp 175-193
- [Coriat 97] B. Coriat, O . Weinstein : *Les nouvelles théories de l'entreprise*, Collection " Références ", Livre de poche, 1997
- [Deforge 85] Y. Deforge : *Technologie et génétique de l'objet industriel*, Maloine ed., Paris, 1985
- [De Rosnay 75] De Rosnay J. : *Le microscope, vers une vision globale*, collection Points, Le Seuil, Paris, 1975
- [Eichenbaum 94] Ch. Eichenbaum, P. Malvache et P. Prieur *La Maîtrise du Retour d'Expérience avec la Méthode REX Performances Humaines & Techniques*, Mars-Avril 1994,.
- [Ermine 93] Ermine J.-L. : *Génie logiciel et génie cognitif pour les systèmes à base de connaissances*, Collection Tec et Doc, Lavoisier, Paris, (1993)
- [Ermine 96a] Ermine J.-L. : *Les systèmes de connaissances*, Éditions Hermès, Paris, 1996
- [Ermine 96b] J-L. Ermine, M. Chaillot, P. Bigeon, B. Charreton, D. Malavieille : *MKSM, méthode pour la gestion des connaissances*, Ingénierie des Systèmes d'Information, AFCET-Hermès, 1996, Vol. 4, N°4, pp 541-575
- [Ermine 99a] J-L Ermine : *La gestion des connaissances, un levier de l'intelligence économique*, Revue d'Intelligence Economique, n° 4, avril 1999, pp 98-111
- [Ermine 99b] J-L Ermine, A. Waeters : *Knowledge Management as a support for Innovation*, Actes du congrès HCP'99, Brest, septembre 1999
- [Evinson 99] L. Edvinsson, M; Malone : *Le Capital immatériel de l'entreprise*, Maxima, Paris, 1999

- [Jacomy 90] B. Jacomy : *Une histoire des techniques*, Collection Points Sciences, Seuil, Paris, 1990
- [Le Moigne 90] Le Moigne J-L : *La modélisation des systèmes complexes*, Afcet Systèmes, Dunod, Paris, 1990
- [Leblanc 94] B. Leblanc, H. Dagorn, D. Bard, J-L Ermine : *Knowledge Management in Human Radioprotection*, ISMICK'94, International Symposium on Management of Industrial and Corporate Knowledge, Compiègne, 26-27 Octobre 1994, 211-220, 1994
- [Moran 96] *Design Rationale : Concepts, Techniques and Use*, T. P. Moran, J. M. Carroll (Ed.) Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1996.
- [Morin 86] Morin E. : *La méthode, 3. La connaissance de la connaissance*, Éditions du seuil, Paris, 1986
- [Morin 90] Morin E. : *Introduction à la pensée complexe*, Communication et complexité, ESF Éd., Paris, 1990
- [Nonaka 95] Ikujiro Nonaka, Hirotaka Takeuchi: *The knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press, 1995
- [OCDE 96].OECD Documents : *Employment and Growth in the Knowledge-based Economy*, OECD, Paris, 1996
- [Picard 99] S. Picard , J-L Ermine , B. Scheurer : *Gestion des connaissances pour des grands logiciels de calcul scientifique*, Actes du congrès IC'99, Ingénierie des Connaissances 99, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 14-18 juin 1999 pp 171-180
- [Stewart 97] Stewart T : *Intellectual Capital, the New Wealth of Organizations*, New York, 1997
- [Strassmann 98] Paul A. Strassmann : *The Value of Knowledge Capital*, American Programmer, March 1998
- [Tounkara 00] T. Tounkara, J-L Ermine, P. Benhamou, C. Rosenthal-Sabroux : *Une méthode intégrant Gestion des Connaissances et Veille* , Actes du congrès IC'2000, Ingénierie des Connaissances 2000, Toulouse, France, 10-12 mai 2000

Publications sur MKSM

- B. Leblanc, H. Dagorn, D. Bard, J-L Ermine : *Knowledge Management in Human Radioprotection*, ISMICK'94, International Symposium on Management of Industrial and Corporate Knowledge, Compiègne, 26-27 Octobre 1994, 211-220, 1994
- D. Malavieille, J-L Ermine, Ct Ribot, C Lions, Lt Condamin : *Etude et réalisation d'un système à base de connaissances d'aide à la décision en cas d'intervention sur des accidents majeurs*, IA'95, 26-30 juin 1995, Montpellier, EC2 eds, 1995
- A. Saadoun, J-L Ermine, C. Belair, J-M Pouyot : *Conception d'un atelier de génie documentaire pour les banques de données juridiques*, IA'95, 26-30 juin 1995, Montpellier , EC2 Ed.
- J-C Royer, M. Chaillot, J-L Ermine : *Gestion des connaissances dans le domaine de la dosimétrie en réacteur*, Conférence AFCET 95, Toulouse, 25-27 octobre 1995
- B. Charreton, J-L Ermine : *From knowledge specification to executable specification*, *Knowledge Engineering and Modelling Languages*, KEML'96, Paris, 15-16 janvier 1996
- B. Charreton, J-L Ermine : *Operationalization of a graphical knowledge representation language*, EKAW'96, Nottingham, UK, may 1996, Poster Session, pp 2- 12
- P. Millerat, J.-L. Ermine, M. Chaillot : *Knowledge management for modelling nuclear power plants control in incidental and accidental states* , Computational Engineering in Systems Applications, CESA'96 IMACS Multiconference, Lille, July 9-12, 1996, Symposium on Modelling, Analysis and Simulation, Vol. 2 pp 982-987
- P. Millerat, M. Chaillot, J.-L. Ermine : *Application de la systématique à la conception d'un modèle de conduite en mode dégradé d'une centrale nucléaire*, 3^{ième} Congrès Européen de Systématique, Rome, 1-4 octobre 1996, pp 1011 - 1017, Kappa Ed.
- A. Saadoun , J.-L. Ermine, C. Belair, J.-M. Pouyot : *A Knowledge Engineering Framework for Intelligent Retrieval of Legal Case Studies*, Artificial Intelligence and Law, Vol. 5, n° 3, pp 179-205, 1997
- J-L. Ermine, M. Chaillot, P. Bignon, B. Charreton, D. Malavieille : *MKSM, méthode pour la gestion des connaissances*, Ingénierie des Systèmes d'Information, AFCET-Hermès, 1996, Vol. 4, N°4, pp 541-575
- J-L. Ermine, M. Chaillot, P. Bignon, B. Charreton, D. Malavieille : *MKSM, a method for knowledge management*, Knowledge Management, Organization, Competence and Methodology, Advances in Knowledge Management Volume 1, , Jos. F. Shreinemakers Ed., pp 288 - 302, Ergon, 1996
- M. Chaillot , J-L. Ermine : *Le livre de connaissances électronique*, Document Numérique, Hermès, Vol 1 n°1, 75-98, 1997

J-M. Van Craeynest J-L. Ermine, C. Chagnot : *Capitalisation des connaissances dans le cadre d'un transfert industriel*, Actes de la conférence IC'97, Ingénierie des Connaissances, Roscoff , 20 - 22 mai 1997

F. Monge, J-C. Royer, J.-L. Ermine, C. Baradel : *Modélisation des connaissances et des systèmes pour la conception d'une aide à la conduite. Application dans le domaine des réacteurs nucléaires*, Actes de la conférence IC'97, Ingénierie des Connaissances, Roscoff , 20 - 22 mai 1997

F. Monge, J-C. Royer, J.-L. Ermine, C. Baradel : *High level Modelling for Designing Supervision Systems*, World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics, IMACS'97, Berlin, Août 1997

F. Barthelmé, J-L Ermine, C. Rosenthal-Sabroux : *An architecture for knowledge evolution in organisations*, European Journal of Operational Research, 109, 414-427, 1998

S. Picard , J-L Ermine , B. Scheurer : *Knowledge Management for Large Scientific Software*, PAKeM'99, Practical Application of Knowledge Management, Londres, 23-27 avril 1999, pp 93-114

A. Besse, J-L Ermine, C. Rosenthal-Sabroux : *Modelling Organisation, Practices and Procedures for Knowledge Books Design*, PAKeM'99, Practical Application of Knowledge Management, Londres, 23-27 avril 1999, pp 175-193

J-L Ermine : *Capter et créer le capital savoir*, Réalités Industrielles, Série Annales des Mines, pp 82-86, Novembre 1998

J-L Ermine : *La gestion des connaissances, un levier de l'intelligence économique*, Revue d'Intelligence Economique, n° 4, avril 1999, pp 98-111

S. Picard , J-L Ermine , B. Scheurer : *Gestion des connaissances pour des grands logiciels de calcul scientifique*, Actes du congrès IC'99, Ingénierie des Connaissances 99, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 14-18 juin 1999 pp 171-180

J-L Ermine , A. Waeters : *Knowledge Management and Capitalisation as a Support for Innovation*, Human Centered Process , HCP'99, Brest, 22-24 septembre 1999, pp 155-161, 11th World Productivity Congress WPC'97, Edinburg, UK, 4-6 Octobre 1999

P. Benhamou , , J-L Ermine , , T. Tounkara, C. Rosenthal-Sabroux : *Une méthode intégrant Gestion des Connaissances et Veille* Actes du congrès IC'2000, Ingénierie des Connaissances 2000, Toulouse, France, 10-12 mai 2000

S. Moisan, J-L Ermine : *Gestion des connaissances opérationnelles sur les codes* Actes du congrès IC'2000, Ingénierie des Connaissances 2000, Toulouse, France, 10-12 mai 2000

J-L Ermine : *Capitaliser et partager les connaissances avec la méthode MKSM*, Traité IC2 (Information, Commande, Communication), Systèmes d'information pour la gestion des connaissances, Hermès, à paraître

J-L Ermine : *Sciences du danger et Ingénierie des connaissances*, Traité IC2 (Information, Commande, Communication), Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production , Hermès, à paraître

Thèses sur MKSM

A. Saadoun : 27/11/96, Université Paris XI, *Construction d'un système à base de connaissances pour l'aide à la recherche d'informations dans le domaine juridique*

D. Malavieille : 20/2/98, Université Paris XI, *Etude et réalisation d'un système à base de connaissances d'aide à l'intervention en cas d'accident majeur*

F. Monge : 17/09/98, Université Paris XI, *Intégration de modèles systémiques pour la conception d'aides à la décision*

B. Charreton : 4/03/99, Université Paris XI, *Etude théorique et opérationnalisation des modèles cognitifs de la méthode MKSM*

S. Picard : (à venir) Université Paris XI, *Gestion des connaissances et codes de calcul*

Bibliographie

- [Andler 92] Andler D. (ed.) : *Introduction aux sciences cognitives*, Folio, Gallimard, Paris, 1992
- [Bateson 81] Bateson G. et al. : *La nouvelle communication*, textes recueillis et présentés par Y. Wilkin., Collection Points, Seuil, Paris, 1981
- [Bergé 84] Bergé P., Pomeau Y., Vidal C. : *L'ordre dans le chaos*, Herman, Paris, 1984
- [Boccaro 68] Boccaro N. : *Les principes de la thermodynamique classique*, PUF, Collection Sup, Paris, 1968
- [Bohr 58] Bohr N. : *Atomic physics and human knowledge*, Wiley, New York 1958, trad. : Physique atomique et connaissance humaine, Gonthier, Paris (Bibliothèque médiations 18), 1964
- [Bougnoux 93] Bougnoux D. : *Sciences de l'information et de la communication*, Larousse, Paris, 1993
- [Brachman 77] Brachman R.J. : *What's in a concept : structural foundations for semantic networks*, Int. J. Man Machine Studies, 9, 127-152, 1977
- [Breuker 1994] Breuker J., Van de Velde W. eds : *CommonKADS Library for Expertise Modelling*, IOS Press, 1994
- [Brillouin 56] Brillouin L. : *Science and Information Theory*, Academic Press, New York, 1956, trad. : *La science et la théorie de l'information*, Masson, Paris, 1959
- [Brunet 94] Brunet E., Ermine J.-L. : *Problématique de la gestion des connaissances des organisations*, Ingénierie des systèmes d'information, Vol. 2, n° 3, pp 263-291, AFCET/Hermès, 1994
- [Card 83] Card S. K., Moran T.P., Newell A. : *The Psychology of Human Computer Interaction*, Hillsdale, N.J., Erlbaum, 1983
- [Caron 89] Caron J. : *Précis de psycholinguistique*, PUF, Paris, 1989
- [Chaitin 87] Chaitin G. : *Algorithmic information theory*, Cambridge University Press, 1987
- [Chapman 87] Chapman D. : *Planning for conjunctive goals*, Artificial Intelligence, 32, pp 333-377, 1987
- [Collins 69] Collins A.M., Quillian M.R. : *Retrieval time from semantic memory*, Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour, 8, 240-248, 1969
- [Collins 70] Collins A.M., Quillian M.R. : *Facilitating retrieval from semantic memory : the effect of repeating part of an inference*, Acta Psychologica, 33, 304-314, 1970
- [Communications 66] : *L'analyse structurale du récit*, Communications, n° 8, 1966, Réédité par les Editions du Seuil, collection Points, Paris, 1981
- [Dahan Dalmedico 92] Dahan Dalmedico A., J.-L. Chabert, K. Chemla (sous la direction de) : *Chaos et déterminisme*, Collection Points Sciences, Seuil, Paris, 1992
- [Delahaye 94] Delahaye J.-P. : *Information, complexité et hasard*, Hermès, Paris, 1994
- [De Rosnay 75] De Rosnay J. : *Le macroscope, vers une vision globale*, collection Points, Le Seuil, Paris, 1975
- [Descles 91] J.-P. Descles : *Architectures, représentations cognitives et langage naturel*, in Les sciences cognitives en débat, G. Vergnaud Ed, Editions du CNRS pp 121-148 (1991)
- [Dreyfus 92] H. Dreyfus : *La portée philosophique du connexionnisme*, in Introduction aux sciences cognitives, D. Andler Ed, pp 352-373, Folio Gallimard (1992)
- [Eckman 92] Eckmann J.-P. : *Mesures dans un système dynamique chaotique*, in Dahan Dalmedico A., J.-L. Chabert, K. Chemla (sous la direction de) : *Chaos et déterminisme*, Collection Points Sciences, Seuil, Paris, 1992
- [Eco 72] Eco U. : *La structure absente, Introduction à la recherche sémiotique*, Mercure de France, Paris, 1972 (Trad. revue et augmentée de l'édition originale "*La struttura assente*" de 1968)
- [Eco 88] Eco U. : *Le signe*, Editions Labor, Collection Média, Paris, 1988 (Trad. revue et augmentée de l'édition originale "*Segno*", 1973)
- [Entrevernes 84] Groupe d'Entrevernes : *Analyse sémiotique des textes, introduction, théorie, pratique*, Presses Universitaires de Lyon, 1984
- [Ermine 89] Ermine J.-L. : *Systèmes experts, théorie et pratique*, Collection Tec et Doc, Lavoisier, Paris, 1989
- [Ermine 93] Ermine J.-L. : *Génie logiciel et génie cognitif pour les systèmes à base de connaissances*, Volume 1 : Aspects méthodologiques, Volume 2 : Etudes de cas, Collection Tec et Doc, Lavoisier, Paris, 1993

- [Fikes 71] Fikes R.E., Nilsson N.J. : *STRIPS : a new approach to the application of theorem proving to problem solving*, Artificial Intelligence, Vol.2, pp 189-208, 1971
- [Fikes 82] Fikes R.E. : *A commitment-based framework for describing informal cooperative work*, Cognitive Science, 6, 331-347, 1982
- [Freud 19..] Freud S. : *Psychopathologie de la vie quotidienne*, Payot, édition de 1973, Paris
- [Froidevaux 90] Froidevaux C., Gaudel M.C., Soria M. : *Types de données et algorithmes*, Mc Graw-Hill, Paris, 1990
- [Ganascia 90] Ganascia J-G. : *L'âme-machine*, Seuil, Paris, 1990
- [Ganascia 91] Ganascia J-G. : *L'hypothèse du "Knowledge level" : théorie et pratique*, dans "Les sciences cognitives en débat", Edition du CNRS, pp 57-71, Paris, 1991
- [Greimas 66] Greimas A-J : *Sémantique structurale*, Larousse, Paris, 1966 (repris chez PUF Paris, 1986)
- [Greimas 70] Greimas A-J : *Du sens*, Seuil, Paris 1970
- [Greimas 83] Greimas A-J : *Du sens II*, Seuil, Paris 1983
- [Gross 67] Gross M., Lentin A. : *Notion sur les grammaires formelles*, Gauthier-Villars, Paris, 1967
- [Hall 56] Hall A.D., Fagen R.E. : *Definition of system*, General Systems Yearbook, 1, 18-28,
- [Hickman 89] Hickman F.R., Killin J., Land L., Mulhall T., Porter D., Taylor R.M. : *Analysis for Knowledge-based Systems, a Practical Guide to the KADS Methodology*, Ellis Horwood, 1989
- [IGL 82] IGL, France : *Introduction à SADT*, Manuel, 1982
- [Jakobson 63] Jakobson R. : *Essais de linguistique générale*, traduit et préfacé par N. Ruwet, Editions de Minuit, Paris, 1963
- [Lachnitt 80] Lachnitt J. : *L'analyse de la valeur, Que sais-je?*, n°1815, P. U. F., Paris, 1980, 3e édition corrigée, 1994
- [La Recherche 94] La Recherche, n° spécial "*La mémoire*", n° 267, juillet/août 1994, Volume 25
- [Le Moigne 77] Le Moigne J.-L. : *La théorie du Système Général, théorie de la modélisation*, PUF, Paris, 1977, 3e édition mise à jour, 1990
- [Le Moigne 90] Le Moigne J.-L. : *La modélisation des systèmes complexes*, Afcet Systèmes, Dunod, Paris, 1990
- [Le Ny 89] Le Ny J-F : *Science cognitive et compréhension du langage*, PUF, Paris, 1989
- [Lévi-Strauss 58] Lévi-Strauss C. : *Anthropologie structurale*, Plon, Paris, 1958
- [Lévi-Strauss 64] Lévi-Strauss C. : *Mythologiques 1 : Le cru et le cuit*, Plon, Paris, 1964
- [MADS 92] MADS : Dos Santos J., Dutuit Y., Ermine J.-L., Lesbats M., Pénalva J.-M., Périlhon P. : *Problématique et méthodologie de la maîtrise des risques*, CYNDINICS'92, Cannes 28-30 Janvier 1992
- [Mandelbrot 77] : Mandelbrot B. : *Fractals : form, chance dimension*, San Francisco, Freeman, 1977
- [Masini 90] Masini G., Napoli A., Colnet D., Léonard D., Trombe K. : *Les langages à objets*, Interéditions, Paris, 1990
- [Mélèse 72] : Mélèse J. : *L'analyse modulaire des systèmes*, réédition de l'édition de 1972, Les Editions d'Organisation, Paris, 1991
- [Minsky 75] Minsky M. : *A framework for representing knowledge*, in P. H. Winston (ed.), *The Psychology of Computer Vision*, McGraw Hill, New York, 1975, ou in *Mind design*, pp 95-128, MIT press, 1981
- [Moles 75] Moles A. : *Préface à "Théorie mathématique de la communication"* par C. Shannon et W. Weaver, Retz-CEPL, Paris, 1975
- [Monod 70] Monod J. : *Le hasard et la nécessité*, Seuil, Paris, 1970
- [Morin 77] Morin E. : *La méthode, 1. La Nature de la Nature*, Editions du seuil, Paris, 1977
- [Morin 86] Morin E. : *La méthode, 3. La connaissance de la connaissance*, Editions du seuil, Paris, 1986
- [Morin 90] Morin E. : *Introduction à la pensée complexe*, Communication et complexité, ESF éd., Paris, 1990
- [Newell 63] Newell A., Simon H. : *GPS a program that simulates human thought*, in "Computers and thought", Feigenbaum and Feldman eds, Mac Graw hill, New York, 1963
- [Newell 72] Newell A., Simon H. : *Human problem solving*, Newell and Simon eds, Prentice Hall, New Jersey englewoog Cliffs, 1972
- [Newell 82] Newell A. : *The Knowledge Level*, Artificial Intelligence, Vol 18, pp87-127, 1982

- [Nicolis 89] Nicolis G., Prigogine I : *A la rencontre du complexe*, Philosophie d'aujourd'hui, PUF, 1989
- [Oswald 86] Oswald. : *Théorie de l'information ou analyse diacritique des systèmes*, Collection technique et scientifique es Telecom, CNET-ENST, Masson, Paris, 1986
- [Piaget 66] Piaget J. et Inhelder B. : *La psychologie de l'enfant*, Que sais-je ? n° 369, PUF, Paris, 1966
- [Piaget 68] Piaget J. : *Le structuralisme*, Que sais-je ? n° 1311, PUF, Paris, 1968
- [Pichot 91] Pichot A. : *Petite phénoménologie de la connaissance*, Aubier, Paris, 1991
- [Quillian 1967] Quillian M. R. : *Word concepts : a theory and simulation of some basic semantic capabilities*, Behavioral Science, 12, 410-430, 1967, trad. in Textes pour une psycholinguistique, Mehler J., Noizet G. (eds) Mouton, Paris-La Haye, 1974, ou *Semantic memory*, in Semantic information processing, (Minsky ed.), pp 27-70, MIT press, 1968
- [Roubine 70] Roubine E. : *Introduction à la théorie de la communication*, Masson, Paris, 1970
- [Ross 77] Ross D.T. : *Structured Analysis : a language for communicating ideas*, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol 3 SE3, n°1, Janvier 1977
- [Sacerdoti 77] Sacerdoti E.D. : *A structure for plans and behaviour*, Elsevier, New York, 1977
- [Sandoval 94] Sandoval V. : *Les techniques du reengineering*, Série Informatique et organisation, Hermès, Paris, 1994
- [Scapin 90] : Scapin D., Pirret-Golbreich C. : *Towards a method for task description : Mad*, in L. Berlinguer and D. Berthelette (Eds), *Work in display units 89*, Elsevier Science Publishers, North Holland, 1990
- [Schefflen 73] Schefflen A.E. : *Communicational Structure : Analysis of a Psychotherapy Transaction*, Bloomington, Indiana University Press, 1973
- [Sebillotte 88] Sebillotte S. : *Hierarchical planning as method for task analysis : the example of office task analysis*, Behaviour and information technology, vol. 7, n° 3, 275-293, 1988
- [Sebillotte 91] Sebillotte S. : *Décrire des tâches selon les objectifs des opérateurs. De l'interview à la formalisation*, Le travail humain, tome 54, N°3, 193-223
- [Shannon 49] Shannon C. E., Weaver W. : *The Mathematical Theory of Information*, Urbana, University of Illinois Press, 1949, trad. : *Théorie mathématique de la communication*, Retz - CEPL, Paris, 1975
- [Simon 58] Simon H., Newell A. : *Heuristics problem solving : the next advance in operations research*, Operations Resarch, Vol. VI p 1-10, 1958
- [Sinai 81] Sinai Y. G. : *L'aléatoire du non-aléatoire*, Priroda (La nature), 3, p. 72, 1981, (Traduction reprise dans Dahan Dalmedico A., J.-L. Chabert, K. Chemla (sous la direction de) : *Chaos et déterminisme*, Collection Points Sciences, Seuil, Paris, 1992, P; 68-87)
- [Sowa 91] Sowa (ed.) : *Principles of semantic networks*, Morgan Kaufmann, 1991
- [Sperber 68] Sperber D. : *Le structuralisme en anthropologie*, Collection Points, Editions du Seuil, Paris, 1968
- [Tassinari 92] Pratique de l'analyse fonctionnelle, Dunod, Paris, 1992
- [Thom 72] Thom R. : *Stabilité structurelle et morphogénèse*, Benjamin, New York, 1972
- [Thom 88] Thom R. : *Esquisse d'une sémiophysique*, Interéditions, Paris, 1988
- [Tran-Thong 78] Tran-Thong : *Stades et concept de stade de développement de l'enfant dans la psychologie contemporaine*, Librairie philosophique J. Vrin, Paris, 1978
- [Van de Velde 94] Van de Velde W. : *An overview of CommonKADS* in Breuker J., Van de Velde W. eds : *CommonKADS Library for Expertise Modelling*, IOS Press, 1994
- [Vergnaud 91] Vergnaud G; (ed.) : *Les sciences cognitives en débat*, Editions du CNRS, 1991
- [Virieux-Reymond 72] Virieux-Reymond A. : *Introduction à l'épistémologie*, Collection Sup, PUF, 1972
- [Vogel 89] Vogel C. : *Génie cognitif*, Collection "Sciences Cognitives", Masson, Paris, 1989
- [Walliser 77] Walliser B. : *Systèmes et modèles*, Seuil, Paris, 1977
- [Watzlawick 67] Watzlawick P., Helmick Beavin J., Don D. Jakson : *Pragmatics of Human communication*, W.W. Norton & Company, inc. New York, 1967 (Trad. : *Une logique de la communication*, collection Points, Seuil, Paris, 1972)
- [Weaver 75] Weaver W. : *Contributions récentes à la théorie mathématique de la communication*, in "Théorie mathématique de la communication", par Shannon. C. et Weaver. W., Retz - CEPL, Paris, 1975