

# **La DYNAMIQUE des SYSTEMES COMPLEXES**

ou

La Systémique de l'ingénieur

Cours de Michel Karsky - 2002

KBS (Knowledge Based Simulation – Connaissance à Base de Simulation)

E-mail : [stephane.copin@gmail.com](mailto:stephane.copin@gmail.com)

## I - Complexités

Le "complexe" est à la mode. Qui ne parle de chaos, de structures bifurcatoires, de fractales? Ce sont là certains des concepts, apparus au cours des dernières décennies, qu'on tente d'utiliser dès lors qu'on se heurte au mur élastique de l'imprévisible, de l'incompréhensible, du mystère.

Ces notions - chaos, bifurcations, fractales -, vulgarisées et parfois galvaudées, mais qui sont basées sur des notions et des théories mathématiques très solides, ne sont que l'étape la plus récente de l'éternelle tentative de l'homme à analyser, comprendre et tenter de maîtriser le monde complexe qui l'entoure.

Nous suggérons ici qu'il existe trois types de « complexité », dont une est résolue, l'autre à la mode, la troisième quelque peu négligée malgré son importance.

### I - 1 - La Complexité Spatiale ou la Complexité de détails

Nous définirons brièvement la notion de Système, dans une connotation d'utilisation pratique et sans faire référence aux nombreuses définitions existantes, comme tout ensemble de variables interconnectées entre elles et s'influençant mutuellement. L'interconnexion implique une notion d'influence spatiale, même si celle-ci s'exerce et se modifie dans le temps.

Doué par nature pour l'étude de tout ce qui concerne les relations dans l'espace, et passionné depuis toujours par l'analyse, la transformation, voire la création de concepts mettant en oeuvre des interconnexions spatiales complexes, l'homme a su profiter pleinement de l'apparition de l'outil idéal pour l'aider dans une telle analyse : l'ordinateur digital qui permet le traitement quasi-simultané d'un nombre colossal de données correspondant à une extraordinaire complexité spatiale, qui équivaut en fait à une complexité de détails. Qui aurait pensé, il y a quelques décennies, pouvoir analyser aussi facilement des structures complexes comportant des milliers, des millions de données ?

Pourtant il ne s'agit là que d'un progrès, d'une évolution, non d'une révolution. Car cette possibilité d'analyse de systèmes de plus en plus complexes, grâce à l'ordinateur digital et aux logiciels du type tableur, dont le développement est maintenant au point et dont on trouve pléthore sur le marché, correspond à notre capacité naturelle à percevoir et à analyser les données multiples ainsi que les influences statiques - de type comptable - entre variables. Ces outils constituent une aide à la connaissance structurelle (spatiale) plutôt qu'à la compréhension du comportement dynamique des systèmes correspondants.

### I - 2 - La Complexité "imprévisible"

C'est sous ce nom que l'on caractérise les systèmes dits chaotiques (1,2), bifurcatoires (3,4), fractals (5,6) et autres, bien qu'ils ne fassent pas appel aux mêmes théories mathématiques. Les deux premiers, comme leur nom l'indique bien, décrivent un comportement temporel incertain a priori, quasiment imprévisible car résultant de systèmes différentiels particuliers comportant très souvent des non-linéarités spécifiques et fortes ("roides"), dont le comportement est très lié à la valeur de certains paramètres.

Mathématiquement très intéressants, très surprenants aussi, ces phénomènes qui semblent parfois correspondre à des comportements statistiquement constatés, présentent un danger : ils autorisent et justifient un refuge dans une incertitude fataliste. Ne sachant pas prédire une bifurcation, un changement d'état ou une modification fondamentale de comportement, même lorsque celle-ci est déterministe, on tend à se satisfaire de considérations générales et philosophiques, certainement enrichissantes pour l'esprit, mais qui ne constituent pas véritablement une aide à la compréhension des phénomènes, ni aux décisions qui devraient en résulter.

L'effet de mode dont bénéficie en ce moment la notion d'imprévisibilité (chaos, bifurcations, cf. (7)) est par ailleurs en train de générer des contre-réactions (8,9,10) mettant en doute l'existence systématique de comportements de ce type dans les sciences sociales. Ces rejets partiels mettent en exergue plusieurs idées :

- la plupart des comportements chaotiques sont obtenus à partir de relations « roides » (stiff), très non-linéaires et toujours un peu semblables, mais dont le caractère réel peut être mis en doute.

- dans les domaines de l'économie, du management, de la gestion et des relations sociales, et contrairement à certains domaines de la biologie où les données sont beaucoup plus nombreuses et sûres et où les constantes de temps sont bien plus courtes, il n'y a pas encore de preuve formelle de l'existence de structures bifurcatoires ou chaotiques; et il ne semble pas que les modèles complexes élaborés en sciences

sociales au cours des trente dernières années, aient généré des réponses de ce type. Des modèles simples ont pu donner lieu à des réactions "chaotiques", mais là encore, ils incluent tous des relations causales dont la quantification semble irréaliste et rend forcément le modèle très instable.

- il n'existe guère d'explication théorique formelle à un comportement individuel ou de groupe, de type chaotique.

- la sensibilité de ces modèles "chaotiques" à toute variation des paramètres est très forte. Lorsque ces paramètres résultent d'observations statistiques, celles-ci ne peuvent pas être suffisamment précises pour assurer une stabilité et un mode répétitif de comportement chaotique ou bifurcatoire des modèles en question. Par ailleurs, un comportement chaotique empêche la mise en évidence de relations invariantes entre variables, donc toute interprétation causale - structurelle - des phénomènes.

Il faut noter que le chaos déterministe, celui dont le comportement est prévisible même si son apparence reste chaotique, ne devrait pas, en toute rigueur, être inclus dans la complexité "imprévisible". Il ne l'est que par l'amalgame qui se fait autour du mot chaos.

Ce mode de comportement fait d'ailleurs l'objet d'études scientifiques très rigoureuses, destinées à mieux en analyser les risques et les limites (11).

### I - 3 - La Complexité Dynamique

Confronté à un système, à une structure comportant un grand nombre d'éléments interconnectés entre eux, l'être humain, dont nous avons déjà dit combien il paraissait naturellement doué pour percevoir et analyser de manière statique des structures complexes et détaillées du point de vue spatial, semble avoir au contraire bien du mal à comprendre, encore moins à prédire leur comportement dans le temps. Pourquoi cette différence de perception des effets du temps et de l'espace ?

Dans son principe, l'explication de cette différence est aisée.

Le comportement temporel d'un ensemble de variables est rendu complexe dès lors qu'apparaissent entre elles des boucles de rétroaction. Que quelques-unes de ces boucles - ces cercles "vieux" ou "vertueux", ces structures homéostatiques ou au contraire explosives - interviennent simultanément ou successivement au sein d'une structure, et nous voilà impuissants à prédire le comportement dans le temps du système correspondant, même si celui-ci est de nature déterministe et invariant. Nous n'avons pas le don d'analyse, d'intuition de ce qui va se passer lorsque au sein d'un système, plusieurs variables interconnectées jouent à la fois le rôle de cause et d'effet.

Pourtant, il y a plus de cinquante ans, est apparue une science, la cybernétique - généralisation de la théorie des asservissements -, utilisée de façon régulière dans toutes les sciences de l'ingénieur, et qui facilite l'analyse des systèmes bouclés. Son succès auprès des ingénieurs a amené certains chercheurs (12 à 17) à transposer cette science au domaine des sciences humaines : management, économie, structures sociales, etc. Après une période initiale de succès ayant donné naissance à une démarche spécifique, voire même à une école de pensée, cette approche de type cybernétique, qu'un des auteurs les plus connus - Jay FORRESTER - a appelé la Dynamique des Systèmes, a vu son développement et son utilisation ralentis au cours des années 70 et 80 (18,19).

Bien que l'on constate depuis quelques années un fort regain d'intérêt et d'utilisation pour cette démarche, en particulier dans les pays anglo-saxons, nous croyons pouvoir écrire qu'il s'agit là d'une science sinon oubliée, tout au moins négligée, surtout compte tenu de son importance et de son utilité pour l'analyse du monde qui nous entoure.

Essayons d'expliquer et de corriger cet "oubli".

Les pages qui suivent - théorie, mode d'emploi pratique et exemples d'applications - sont destinées :

- à présenter les principes et les concepts de base de la Dynamique des Systèmes Complexes,
- à donner au lecteur intéressé une méthodologie de base lui permettant d'appliquer la démarche en évitant à la fois un blocage initial, mais aussi un découragement éventuel devant l'ampleur apparente de la tâche,

- à montrer, à travers quelques exemples pratiques d'applications, à la fois des modèles complets et leur utilisation possible (simulations).

## II - La Dynamique des Systèmes Complexes – Les Principaux Concepts

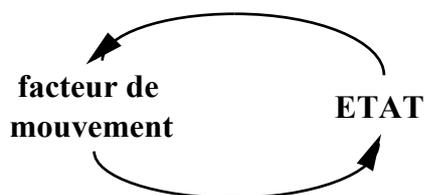
### II - 1 - Définitions et Domaines d'Application

Le terme Dynamique sous-entend explicitement le mouvement, le changement. La Dynamique des Systèmes Complexes est la science du changement, de l'évolution. Mais, à la différence de la Cinématique, elle aussi science de la connaissance du mouvement, le concept de Dynamique implique l'analyse des facteurs qui créent le changement, ou au contraire s'y opposent. Au-delà de la connaissance, le mot Dynamique implique une compréhension des phénomènes et de leurs causes.

Tout comme le mouvement dans l'espace d'un mobile déformable est déterminé par l'ensemble des forces internes et externes qui agissent sur ce mobile, de même le comportement des structures socio-économiques qui forment notre environnement, résulte d'un ensemble de facteurs, de poussées ou d'inerties sans cesse évolutives : forces économiques intrinsèques (structurelles) au système, viscosités socio-culturelles tempérant, ralentissant le changement, impulsions politiques plus ou moins imprévisibles pouvant, parfois, changer le cours des choses.

Ces facteurs responsables du changement – on parlerait de forces en mécanique -, dont l'effet peut être représenté au moyen d'un système d'équations différentielles, modifient l'état du système qui peut être caractérisé à chaque instant par un vecteur d'état. Mais ces forces ne sont pas figées, elles évoluent souvent de manière structurelle, c'est-à-dire en fonction de l'état de ce système qu'elles ont elles-mêmes contribué à changer.

Tout dirigeant de PME comprendra aisément la différence entre la notion de "force" et celle d'"état". Une bonne gestion, un contrat d'assurance solide, une trésorerie saine, constituent des piliers qui protègent de la catastrophe. Mais seule la recherche de clients, de contrats nouveaux constitue la force, la poussée qui assure un développement de l'entreprise. Et l'on sait bien que la recherche de clients nouveaux (force active) est influencée par la situation financière (état du système) de la société, qu'elle peut se faire d'autant plus aisément que cette situation financière est saine.



Nous avons là une boucle de rétroaction, la première d'une longue série, cette boucle de principe symbolisant en réalité de nombreuses boucles imbriquées reliant dans les deux sens variables d'état et forces agissantes.

Naturellement, lorsqu'il s'agit d'une boucle unique, régulatrice ou au contraire accélératrice (cercle vicieux ou vertueux), l'analyse de son comportement est d'autant plus aisée que les relations causales incluses dans la boucle sont linéaires. Quelques ouvrages récents (20, 16) donnent des exemples de comportement de telles boucles de rétroaction dans les domaines économiques et sociaux.

### II - 2 - Les Boucles Stabilisatrices

Une boucle régulatrice, stabilisatrice, tendra à amener de façon asymptotique la structure correspondante vers un état d'équilibre : on parlera de comportement homéostatique ou d'équilibration, les cybernéticiens préféreront utiliser la notion de « boucle négative », car caractérisée par un nombre impair de relations négatives entre variables (on parlera de relation négative lorsqu'une variation - accroissement ou baisse - de la variable cause créera un effet en sens inverse)



(Si X croît, alors Y décroît, inversement une décroissance de X entraîne une croissance de Y).

Le comportement général d'une telle boucle, en l'absence de délai entre cause et effet, sera le suivant :

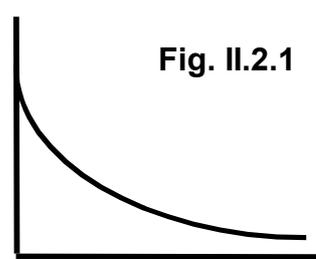
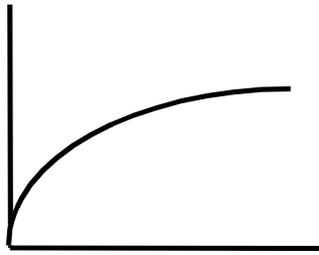
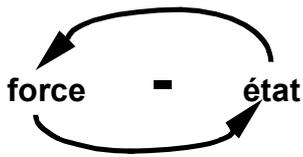
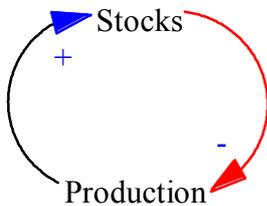


Fig. II.2.1

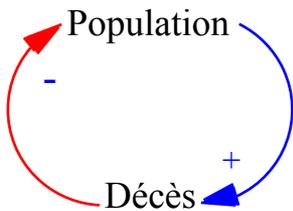
Nous verrons plus loin qu'une boucle homéostatique - stabilisatrice - se comporte souvent de manière moins simple, moins monotone (au sens mathématique du terme, c'est-à-dire ayant des variations dans le temps allant toujours dans la même direction).

Voici quelques exemples de boucles régulatrices :



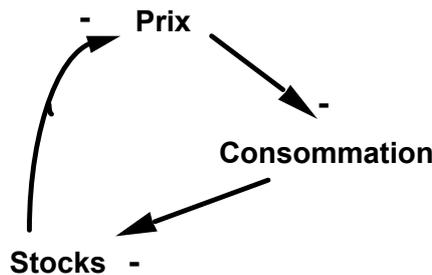
Un stock résulte directement du niveau de production. Et plus il y aura de stock disponible, moins on aura tendance à produire. Une augmentation de stock résultant d'une forte production tendra à réduire cette dernière (effet stabilisateur).

Fig. II.2.2 : Boucle Stock - Production



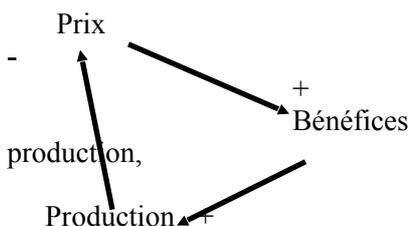
Plus il y aura de vivants, plus il y aura de décès". C'est cette LaPalissade que résume la flèche positive reliant la Population aux Décès. Or ces derniers ont pour effet de diminuer la Population, d'où la nature régulatrice de cette boucle qui a pour effet de stabiliser la population.

Fig. II.2.3 : Boucle Population - Décès



Un accroissement de prix d'un produit (matière première, par exemple) aura un effet contraire sur sa consommation, c'est à dire qu'il aura tendance à ralentir. D'où une moindre baisse des stocks disponibles, donc une moindre montée des prix. On a bien un effet stabilisateur (boucle « négative »), c'est à dire un effet allant à l'encontre de la variation initiale des prix.

Fig. II.2.4 : boucle Prix - Consommation



En parallèle avec la boucle précédente qui concerne la consommation, la boucle de production est aussi stabilisatrice : une augmentation des prix tend, par l'effet des bénéfices engrangés, à faire croître la production, ce qui régule à terme la montée des prix.

Fig. II.2.5 : Boucle Prix Production

### II - 3 - Les Boucles Explosives

L'appellation populaire de ce type de boucle est le « cercle vicieux » (ou, depuis peu, « vertueux » selon que l'effet, croissant ou décroissant mais toujours de manière de plus en plus rapide, apparaît favorable ou défavorable à la personne concernée). Ce type de boucle de rétroaction a un comportement explosif (croissance exponentielle) ou implusif (décroissance de plus en plus rapide - le crash !)

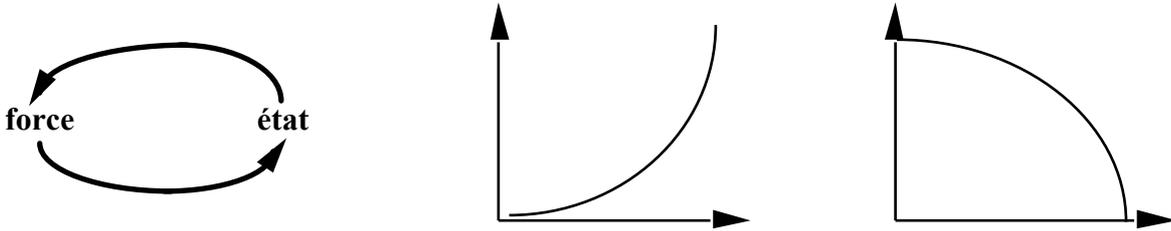
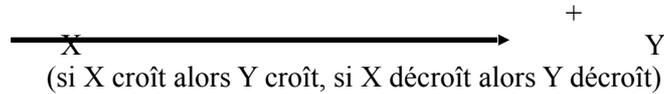
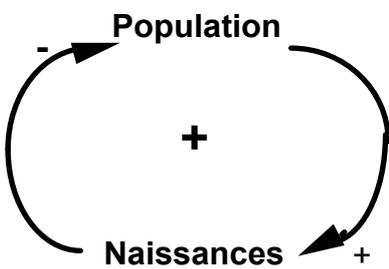


Fig. II.3.1

On dit aussi de ces boucles qu'elles sont « positives » : elles ne doivent comporter que des relations entre variables qui soient positives (un accroissement ou au contraire un affaiblissement de la cause créera un effet dans le même sens) ou un nombre pair de relations négatives.

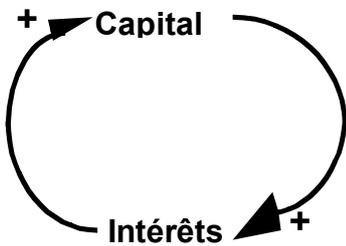


Quelques exemples :



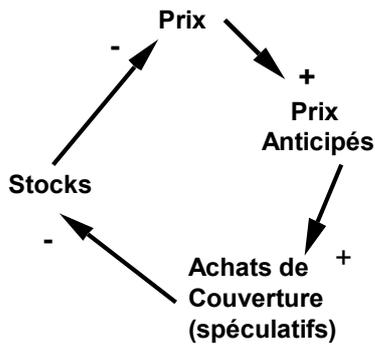
Toutes choses égales par ailleurs (une phrase que l'on retrouvera souvent par la suite, qui aide au raisonnement, mais qui ne s'avère jamais être vraie dans la réalité), plus une population est importante, plus il y a de naissances qui ont pour effet, à leur tour, d'accroître la population. Il y a là une boucle potentiellement explosive, comportement vérifié à ce jour par l'évolution mondiale de la population humaine

Fig. II.3.2 : boucle Population – Naissances



Quel que soit le taux d'intérêt (non nul), un capital auquel on ne touche pas croît de manière exponentielle (mais pas forcément aussi vite que l'inflation).

Fig. II.3.3 : Boucle Capital - Intérêts



Il s'agit là d'une boucle représentative des effets spéculatifs : une croissance rapide des prix mène à des achats de couverture (ou spéculatifs selon le cas) qui vident dans une certaine mesure les réserves, c'est à dire les stocks, et font donc croître encore plus les prix, justifiant par là-même les achats de couverture.

Fig. II.3.4 : Boucle Achats Spéculatifs

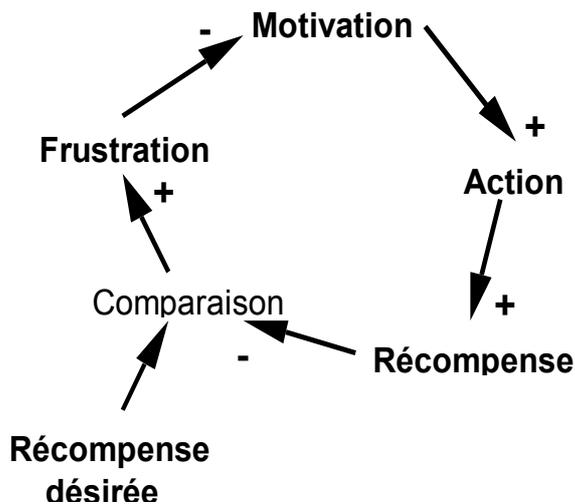


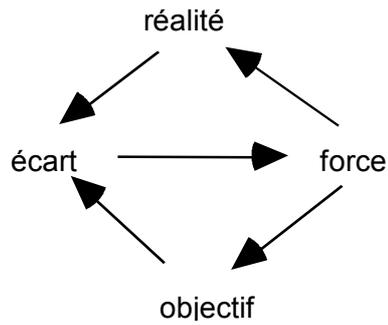
Fig. II.3.5 : Boucle de la Frustration

La boucle de frustration-inhibition, chère au neurophysiologue Henri Laborit, s'analyse ainsi : plus on est motivé, plus on agit (là encore : toutes choses égales par ailleurs) et plus on a de résultats qui augmentent la satisfaction ressentie (gratifications de toutes sortes, travail intéressant, compliments, etc.). Mais par ailleurs, cette satisfaction est toujours comparée au désir que l'on a d'être récompensé, complimenté, de faire du travail intéressant,... Si la réalité est en deçà des aspirations, il peut se développer chez certains individus un sentiment de frustration et même d'inhibition qui va à l'encontre de la motivation. L'analyse de cette boucle montre qu'il y a 2 signes moins, ce qui en fait une boucle positive, implosive : une baisse de motivation génère moins d'action, moins de résultats et de satisfaction, donc un accroissement du sentiment de manque par rapport aux aspirations, ce qui est frustrant, ce qui démotive... la boucle correspondante peut faire décroître la motivation de plus en plus vite.

## II - 4 - Notion d'objectif

Dans ce dernier exemple, nous voyons apparaître pour la première fois la notion de comparaison. En pratique, il est très rare de voir une boucle de rétroaction agir de façon isolée. Pour une raison de principe, ces boucles vont au moins par paire. Car une "force" agissant sur certaines variables qui caractérisent l'"état" du système, résulte toujours de, ou est elle-même influencée par, la comparaison entre deux "états" : le but d'une part, la réalité d'autre part. C'est la différence entre objectif et réalité qui pousse à l'action, qui génère une (ou des) « force(s) » qui aura pour effet de modifier à terme la réalité... et, plus tard encore, l'objectif.

Fig II.4.1



Cette notion d'objectif se rattache à la notion de finalité, présentée au chapitre 1 (1-3-4), dont elle constitue une expression qui sera à la fois formalisée et quantifiée.

La notion de comparaison entre objectif et situation réelle, peut être très utile pour démarrer la modélisation d'un système, en nous obligeant à chercher les variables d'état caractérisant le système, mais aussi les variables « objectif » correspondantes, sans oublier qu'il s'agit bien de variables qui évolueront dans le temps en fonction des résultats (rebouclage interne), mais aussi en fonction d'événements extérieurs (événements dont l'occurrence ne dépend pas du système étudié, qui sont générés hors des frontières du système).

## II - 5 - Interaction entre Boucles

L'interconnexion de deux boucles, dont les comportements individuels possibles sont limités aux quatre courbes décrites précédemment, peut donner lieu, si certaines relations entre les variables comportent des retards (délais), aux comportements types suivants :

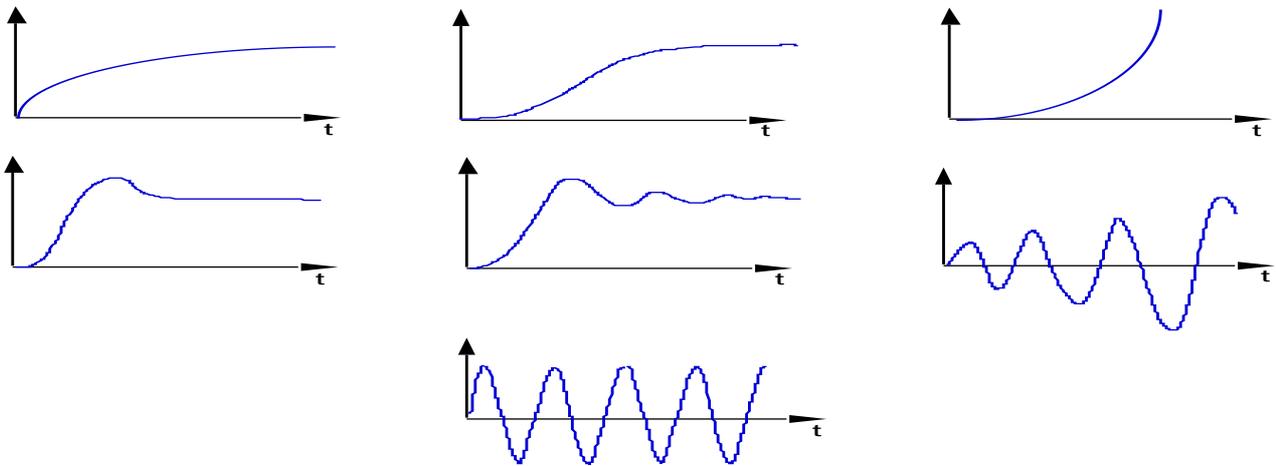


Fig. II.5.1

et nous verrons bientôt combien le problème peut se compliquer si ces boucles de rétroaction comportent des éléments non-linéaires.

Le comportement temporel d'un réseau comportant plusieurs boucles interconnectées ne peut se déduire aisément de l'analyse du comportement individuel de chaque boucle (un exemple amusant a récemment été décrit (21) par des spécialistes de la Dynamique des Systèmes Complexes : se référant à une description du comportement présumé explosif d'une structure ne comportant en réalité qu'une boucle stabilisatrice, ils montrent combien il est facile, si l'on n'y prend pas garde, de se fourvoyer dans des raisonnements faux), et que dire alors d'un système comportant 50 ou 100 boucles de rétroaction ?

C'est le moment de revenir au fondement de la Dynamique des Systèmes, cette science ainsi nommée et développée par Jay FORRESTER. Il faut la considérer avant tout comme une attitude, une démarche de perception et d'analyse des structures bouclées que l'on trouve presque partout dans ce qui nous entoure -

économie, environnement, sociologie - ou ce dont nous sommes constitués - vie biologique, médecine, psychologie, etc. -.

Ce n'est pas là une « théorie » éventuellement réfutable, c'est une réalité que l'on constate et que l'on ne peut que subir. Cette présence et l'effet des boucles, beaucoup l'occultent sans trop sentir le danger à court terme puisque, nous le verrons bientôt, les rétroactions ne sont jamais instantanées et rarement rapides. Ce sont d'ailleurs ces boucles plus ou moins lentes, c'est-à-dire à grande constante de temps, à long temps de réaction, qui font un des intérêts majeurs de la Dynamique des Systèmes. Les boucles rapides, celles que nous subissons tous les jours et dont nous sommes habitués à prévoir les effets quasi immédiats, sont depuis toujours prises en compte lors des décisions, ou pour toute prévision.

Les boucles lentes, par contre, celles dont l'effet ne se fait sentir que très tard, très lentement mais d'autant plus sûrement que la cause, souvent ignorée ou mal perçue, a depuis longtemps disparu, boucles difficiles à prévoir, à analyser et à quantifier, ces contre-réactions là sont très souvent rejetées, occultées, éliminées pour diverses raisons : ignorance, paralysie devant la difficulté de quantification, syndrome du « après moi le déluge ». A terme - ce terme dépendra du problème traité - on ne pourra que subir à son corps défendant les contre-réactions précédemment incomprises, mésestimées ou refusées.

Pourtant, des outils existent maintenant, qui permettent d'analyser l'effet des boucles de rétroaction, souvent de prévoir les comportements dynamiques des systèmes en question, et surtout de suggérer des modifications possibles, sans faire appel à une expérimentation qui, dans de nombreux domaines comme par exemple les sciences sociales, est impossible ou très difficilement réalisable.

Il s'agit d'une part de la science des systèmes asservis (feedback theory), développée au début des années 50, qui a permis de comprendre les principes de comportement des systèmes bouclés. Il s'agit aussi des outils de simulation sur ordinateurs, outils depuis longtemps utilisés en aéronautique (oserait-on, de nos jours, faire voler un avion, une fusée, sans en simuler auparavant le comportement dynamique dans toutes les circonstances imaginables, y compris des conditions extrêmes d'utilisation ?), lors de la construction de réacteurs nucléaires, ou en météorologie, et qui deviennent de plus en plus faciles à utiliser dans les domaines plus ou moins "flous" qui nous concernent. Ces outils sont particulièrement bienvenus lorsque les relations qui lient les variables constitutives d'un système sont complexes, non-linéaires, comportent des retards, etc. L'analyse purement mathématique de tels systèmes est alors trop ardue, et les techniques de simulation rendues possibles par l'existence de l'ordinateur, constituent maintenant une aide précieuse à toute étude de comportement de système complexe.

On notera notre préférence, notre insistance même, à associer le concept de boucle, une des notions fondamentales de la systémique, et les outils pratiques de simulation qui, adjoints à la notion de rétroaction, caractérise la Dynamique des Systèmes. C'est cette association de concepts qualitatifs et de moyens pratiques de formalisation et de quantification qui définit et caractérise la Dynamique des Systèmes.

Concept et pratique peuvent dans une certaine mesure être dissociés, c'est là une tendance de la Systémique théorique, de ce qu'on appelle aussi aux USA « System Thinking ». Il est vrai que le phénomène de rétroaction a tellement été négligé et mal perçu depuis les années 70, qu'il est utile d'insister tout d'abord sur la réalité de ce concept, d'en rappeler - c'est ce que nous faisons ici-même, c'est ce qu'a fait Peter SENGE dans son excellent livre (20) - l'omniprésence et les effets à terme, souvent contre-intuitifs. Il est utile de rappeler qu'en présence de boucles de rétroaction, certaines décisions « importantes » s'avèrent en fait être sans effet ou même nuisibles. Il est bon de faire comprendre qu'il y a une science des systèmes bouclés, et que cette science - elle-même complexe - peut être précieuse pour éviter des actions inutiles ou contre-productives.

Toutefois, la notion de boucle de rétroaction, sans sa mise en pratique - c'est-à-dire sans la simulation - se heurte très vite au mur de la complexité.

Nous ne le dirons jamais assez, aucune analyse théorique ne permettra de connaître et de comprendre les comportements de systèmes comportant 20, 30, ou 50 boucles de rétroaction, même si ces boucles ne sont pas toutes actives en même temps au sein du système (c'est même là une des difficultés de l'analyse : quelle boucle est active, quand, et pourquoi ?).

Au-delà d'une analyse purement théorique, quasi-impossible à cause de la taille et de la complexité des systèmes, seule la simulation, rendue « démocratique » par le développement de la micro-informatique, permet d'analyser avec intelligence d'abord, avec précision ensuite, les comportements possibles de ces systèmes complexes. C'est cette démarche pratique que nous aborderons dans les chapitres qui suivent, après avoir introduit deux notions qui participent à la complexité croissante des systèmes.

## II - 6 - Retards et Délais

En fait, les comportements décrits ci-dessus, qu'ils soient stabilisateurs ou explosifs, correspondent à des structures comportant un ou plusieurs délais entre variables. Dans la réalité qui nous environne (entendons par là tous les domaines pratiques qui sont du ressort de la Dynamique des Systèmes Complexes : économie, finance, sociologie, management, stratégie, etc.), les relations d'influence, lorsqu'elles ne sont pas de nature purement comptable, comportent en effet presque toujours des délais qui représentent la non-instantanéité des relations de cause à effet.

Reprenons quelques-uns des exemples cités précédemment.

- Boucle « stock - production » : ce n'est pas instantanément que l'évolution d'un stock influence la production correspondante. Il y a toujours un temps de réaction, correspondant en général à un délai de prise en compte des réalités et des informations correspondantes.

Notons, à propos de cet exemple, que les relations causales n'ont pas toutes les mêmes significations : la relation entre production et stock est une relation physique : une quantité produite remplit automatiquement un stock, même si celui-ci peut être tout de suite vidé par ailleurs. Par contre, la relation entre stock et production est une relation à la fois d'information et de décision, et ce n'est pas une relation automatique : on peut décider de continuer à produire quel que soit le niveau des stocks. C'est aussi une relation non-instantanée, il y a toujours un retard entre l'information et la décision qui doit en résulter.

- Boucle « prix - consommation » : ce n'est qu'au bout d'un certain temps qu'une variation de stock peut avoir un effet contraire sur le prix. Il sera utile de le noter ( $d$  = délai) sur le schéma causal correspondant, de même qu'il sera préférable de différencier les relations causales compte tenu de la remarque ci-dessus (par exemple en marquant en pointillés les relations d'information - décision) :

**Fig. II.6.1**

La même remarque vaut évidemment pour la relation entre production et prix dans la boucle « prix - production ». Une variation de production, agissant immédiatement et automatiquement sur le stock, n'influera sur le prix qu'au bout d'un certain temps. De même, ce n'est qu'après un plus ou moins long processus décisionnel que la production suivra l'évolution des bénéfices.

**Fig. II.6.2**

Nous laisserons au lecteur le soin de chercher sur les autres boucles décrites précédemment, en particulier sur les boucles explosives, les délais qui peuvent exister entre cause et effet.

Ainsi suggérée, cette notion de retard paraît évidente. Ce qui l'est moins, c'est l'accumulation, disons plutôt la combinaison des délais ; combien de managers, combien de décideurs ont été étonnés de ne pas obtenir, dès que prévu, les résultats espérés de leurs décisions. Ils avaient bien tenu compte de chacun des délais, mais pas de leur combinaison dans une structure complexe.

Prenons un exemple dans le domaine des structures d'information, en se basant sur la boucle Information - Décision - Action - Résultat (IDAR), constituée en réalité de multiples boucles semblables interconnectées, toute décision étant prise en général sur la base de plusieurs informations.

La relation d'influence qui lie chacune des variables ci-dessus, est soumise à un délai. Mais certains de ces retards peuvent eux-mêmes dépendre d'autres délais. Par exemple, si le résultat R dépend de la période de l'année à laquelle l'action A est commencée (effet de saisonnalité), alors les délais  $d_1$  et  $d_2$  qui retardent la décision et le démarrage de l'action, influenceront  $D_3$ , rendant la dynamique, c'est-à-dire le mode de comportement du système, bien plus complexe que prévu.

On comprend alors que seule une simulation puisse effectivement rendre compte et représenter une telle combinaison de retards.

Par ailleurs, ceux-ci sont souvent connus avec une très grande imprécision. On sait qu'ils existent, on sait qu'ils ont un effet, mais on ne sait pas les mesurer. Souvent c'est le modèle et les simulations correspondantes qui nous amènent à proposer à l'expert, au décideur, les valeurs de certains délais, valeurs qui seules permettent de retrouver correctement la réalité. Dans ce cas, au-delà d'une compréhension permettant une représentation valable de la réalité, le modèle permet d'en affiner, d'en préciser la connaissance.

Lors de nos premières tentatives de modélisation du marché pétrolier mondial (modèle MARPET, réalisé au sein de ELF-Aquitaine, cf. chapitre 7), nous avons introduit de nombreuses variables, soit de retard, soit au contraire d'anticipation des phénomènes. En particulier, nous pensions, sur la foi d'affirmations d'experts du marché, que les acteurs de ce marché mondial du pétrole brut avaient anticipé, en 1978, avec au moins six mois d'avance la crise à la fois politique et pétrolière qui secouait l'Iran et allait déboucher, au début de 1979, sur le départ du Shah et, entre autres conséquences brutales, à un arrêt quasi-total de la production iranienne de brut.

Or, avec un tel horizon d'anticipation (6 mois), le modèle ne fonctionnait pas bien et représentait mal la réalité, c'est-à-dire, en particulier, la brutale flambée des prix. Ce n'est qu'en réduisant cet horizon à 6 semaines que l'on put faire correspondre simulation et réalité. Une analyse à la loupe des données historiques nous permit de constater, en effet, une réaction très tardive du marché, quelques semaines seulement avant les événements, et non quelques mois comme nous (modélisateurs et experts pétroliers confondus) l'avions naïvement pensé a priori.

Il s'agit là d'un exemple réellement vécu où la modélisation aide l'expert à mieux connaître, à chiffrer plus exactement des relations d'influence ainsi que des données qui sont parfois difficilement mesurables ou, plus prosaïquement, qu'on n'a simplement pas eu l'idée de mesurer.

Cette notion de retard n'est qu'une des causes possibles de dégradation du comportement d'un système, en particulier d'un système d'information. Si l'on se réfère à la boucle IDAR de la page précédente, il y a information et utilisation de l'information. L'information, avant ou pendant son utilisation, peut être dégradée : il peut y avoir (il y a presque toujours) des erreurs aléatoires sur la prise en compte de l'information, et, distorsion plus ou moins involontaire de celle-ci. De plus l'information arrive ou est utilisée avec retard, et est rarement utilisée en continu : il y a plutôt échantillonnage de l'information, échantillonnage quotidien, hebdomadaire, mensuel, etc. ou encore à fréquence variable selon les besoins et les disponibilités des personnes impliquées. Il faut donc redessiner cette boucle IDAR :

### Fig. II.6.5

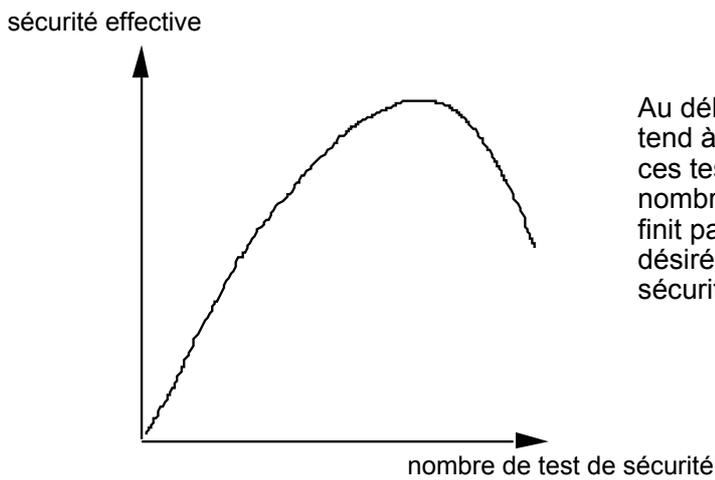
On comprendra aisément que l'addition de boucles supplémentaires accroîtra encore la complexité de comportement du système (nouvelles fréquences propres, oscillations plus ou moins amorties, avec fréquences variables, etc.). Une décision, par exemple, est rarement prise sur la base d'une seule information. Il y aura, dans l'exemple IDAR ci-dessus, plusieurs boucles interconnectées, avec comme points de jonction les variables de DECISION ou encore les variables de RESULTAT qui sont souvent la conséquence de plusieurs actions. Bien que déterminés, répétitifs et théoriquement prédictibles, les comportements qui risquent de résulter de ce labyrinthe de boucles interconnectées, sont suffisamment complexes pour ne pas pouvoir être appréhendés avec précision sans l'aide d'outils spécifiques, à savoir les outils de simulation.

D'autant que ces boucles, déjà complexes, font appel, en plus de la notion de retard, à deux autres notions fondamentales :

- le principe de non-linéarité.
- le principe d'évolution des structures.

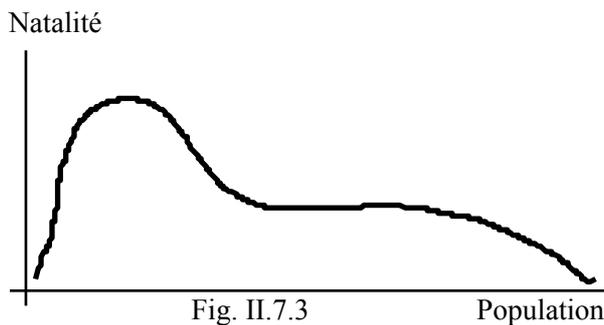
## II - 7 - Les Non-Linéarités

Dans la réalité du monde qui nous entoure, la plupart des relations d'influence entre variables comportent un élément de non-linéarité, de non-proportionalité stricte entre cause et effet. Donnons quelques exemples simples de relations non-linéaires entre variables.



Au début, tout nouveau test de sécurité tend à accroître la sécurité effective. Mais si ces test de sécurité deviennent trop nombreux, toute adjonction d'un test nouveau finit par produire un effet inverse à celui désiré, c'est à dire tend à faire retomber la sécurité effective

**Fig II.7.2**



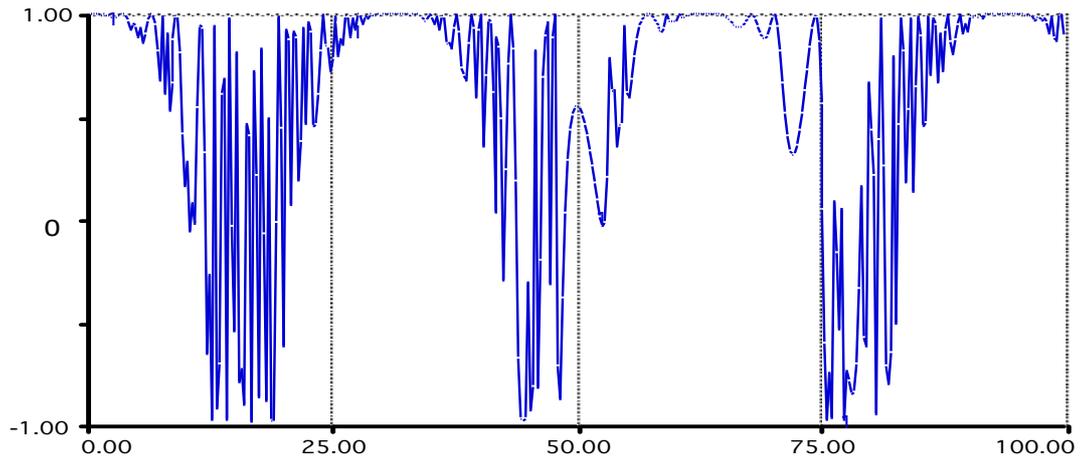
En cas de surpopulation, la natalité a tendance à baisser. En cas de sous-population, il y a un effet de compensation (baby boom), mais si la population décroît trop, la natalité se met à baisser dangereusement (risque d'extinction de l'espèce).

**Fig. II.7.3**

La présence de relations exprimées par des courbes comme celles des figures II.7.2 et II.7.3, explique en partie la complexité des systèmes contenant de telles relations. La courbe de la figure II.7.2, par exemple, introduite comme relation d'influence dans la boucle de sécurité, transforme une boucle négative, stabilisatrice (le but recherché) en une boucle positive, explosive (résultat contre-intuitif et potentiellement catastrophique).

Quant à la courbe de natalité (Fig. II.7.3), sa forme relativement compliquée explique (23) certains résultats curieux et inattendus (catastrophe différée) que nous présenterons plus loin.

La présence de relations non-linéaires ne facilite ni l'analyse formelle (mathématique), ni la compréhension du comportement temporel des structures étudiées. Les graphiques de la Fig. II.5 avaient été générés par l'interconnexion de deux boucles ne comportant que des relations linéaires représentant les dynamiques d'une population dont natalité et mortalité dépendent de cette même population. L'adjonction de non-linéarités au sein de ces deux boucles enrichirait infiniment le comportement, par exemple comme suit (le graphique de la figure 7 mérite, par son apparence chaotique, son sous-titre tiré d'une nouvelle de Salman Rushdie), mais ce n'est là qu'une des nombreuses possibilités de comportement non-linéaire, dont on notera qu'il s'agit là d'un "chaos" déterministe, donc analysable, prédictible et à la limite maîtrisable :



***"Variety of Behaviour assists in Evasion of Detection"***

(Salman Rushdie : HAROUN and the sea of stories)

Fig. II.7.5

Malheureusement, les possibilités d'analyse explicite d'un système d'équations différentielles non-linéaires, sont encore limitées. C'est là une raison supplémentaire pour faire appel et aller jusqu'au bout du processus de simulation, afin de pouvoir analyser des comportements complexes, afin aussi de mettre en évidence des phénomènes inattendus, contre-intuitifs, parfois fugitifs et pouvant donc aisément passer inaperçus.

## II - 8 - L'Évolution Structurelle

Nous n'entendons pas par-là l'apparition de relations causales ou structurelles nouvelles, correspondant à une évolution imprévisible et jusqu'alors inconnue du système en cause. De telles évolutions, qui relèvent de la notion de création humaine, ne sont pas - ou pas encore - du ressort de la Dynamique des Systèmes (contrairement à la possibilité d'auto-organisation, que l'on peut aisément modéliser et simuler).

Prenons un exemple :

Dès la plus haute préhistoire, on sait que l'être humain fut à la fois prédateur et destructeur - ou tout au moins transformateur - de son environnement. Ainsi, dans son désir d'étendre les zones cultivables autour de son lieu d'habitation et d'activité, l'homme ne cessa d'abattre des arbres, d'arracher des forêts. Pour cela il fabriquait des haches avec les ramures des cerfs habitant la forêt environnante. Plus il agrandissait son domaine en détruisant la forêt, plus les cerfs s'éloignaient dans ce qui restait de la forêt, plus il devenait difficile de trouver des ramages et de fabriquer l'outil nécessaire à l'abattage des arbres. Une telle évolution de la situation, très aisément modélisable et simulable, se traduit, tant dans un modèle que dans la réalité, par une stabilisation progressive de la situation : une forêt aux frontières suffisamment éloignées pour empêcher l'homme d'acquérir l'outil permettant d'étendre son domaine.

Alors - au bout de combien de millénaires ? - l'homme découvrit le fer et se mit à l'utiliser à la place des ramures de cerf, pour poursuivre le défrichage de la forêt et accroître infiniment sa zone d'activité. Cette issue - qui n'était d'ailleurs pas la seule possible - est de nature imprévisible et n'est donc pas incorporable à priori dans une analyse et une modélisation du processus.

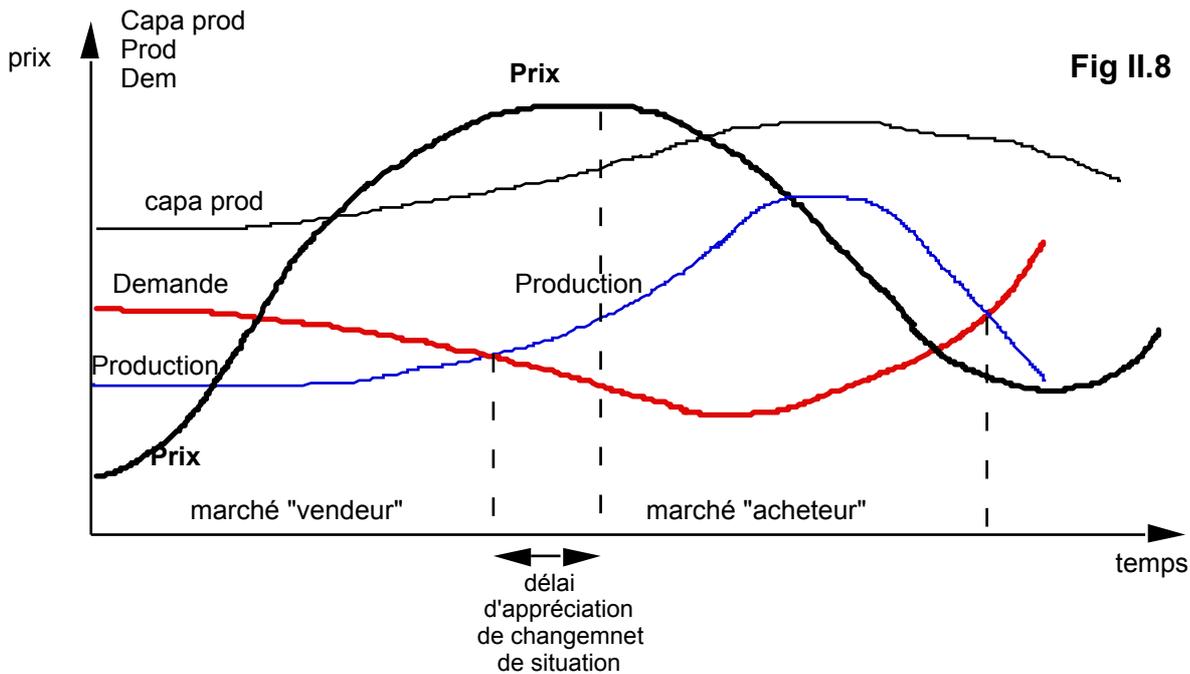
Par contre, si la création de structures nouvelles n'est pas encore du ressort de notre science, l'évolution des structures est parfaitement analysable et souvent prévisible.

Lors d'une analyse un tant soit peu approfondie d'un système socio-économique réel, on constate vite que les relations entre variables ainsi que les boucles de rétroaction mises en évidence, ne sont pas toutes actives au même moment. Selon l'évolution du système, selon l'état dans lequel il se trouve à un instant donné, telle boucle pourra être active ou pas, prédominante ou sans effet. Il en résultera une possibilité de changement, parfois radical, parfois très rapide, de comportement. En fait, ce changement structurel constaté est prévisible, car contenu implicitement dans la structure.

Prenons l'exemple de certains marchés de matières premières. Nombre d'entre eux passent périodiquement de l'état de marché de vendeurs à celui d'acheteurs. En fait, quel que soit son état à un instant donné, un tel marché comporte en son sein le principe embryonnaire d'un changement d'état à venir.

Si, par exemple, le marché est "vendeur", la production étant inférieure à la demande pour des raisons probables d'insuffisance de capacité de production, les prix vont croître, ce qui génèrera à terme (délai) à la fois une certaine baisse de la demande (bien qu'au début il y ait danger d'apparition d'achats de couverture qui accélèreront encore la hausse des prix : cercle vicieux, boucle accélératrice) et une hausse des investissements pour satisfaire la demande dans un domaine qui paraît rentable.

C'est ce croisement entre baisse de la demande et hausse des capacités de production et de la production correspondante qui fera passer, après un certain délai d'appréciation (retard de transmission, de prise en compte des informations), le système de l'état de vendeur à celui d'acheteur. Le même raisonnement, prolongé, montrerait la probabilité raisonnée et presque toujours constatée, d'un nouveau changement ultérieur du mode de comportement du système.



Or il y a des différences fondamentales de comportement entre marchés « vendeur » et « acheteur ». Dans un cas, nous aurons un risque d'apparition de comportements spéculatifs (achats de couverture), dans l'autre, les comportements seront inverses (achats prudents, déstockage, etc.). Le passage d'un mode de comportement à l'autre peut être brutal, la transition peut être plus ou moins courte. Mais dans presque tous les cas, les changements à venir, lorsqu'il ne s'agit pas de création de nouvelles structures jusqu'alors inconnues, sont analysables, modélisables, quantifiables et prévisibles. Un modèle bien conçu aura tous les éléments pour représenter et générer (prévoir) le changement de structure et de comportement, de manière quasi automatique et plus ou moins continue.

Mais prévisible ne veut pas dire prévu. On a du mal, en effet, à concevoir une réalité anticipée qui soit vraiment différente du présent, à agir en fonction d'une structure future dont le comportement semble nouveau, inconnu et dont l'analyse paraît incertaine et surtout risquée. Ose-t-on souvent anticiper de tels changements, prendre des décisions en fonction de structures, de situations futures prévisibles mais non certaines, d'évolutions parfois rencontrées déjà dans le passé, mais oubliées depuis longtemps ?

Potentiellement, c'est là un atout majeur de la Dynamique des Systèmes Complexes, que de pouvoir aider à analyser, à prévoir, à comprendre les changements structurels de comportement, ceux tout au moins qui sont implicitement inscrits dans de nombreux systèmes.

En contrepartie, on constate, contrairement à ce que l'on pourrait penser intuitivement, qu'un modèle représentatif et fiable d'une réalité complexe, bien que toujours réducteur de la réalité, est "plus complexe que la réalité". Car il représente non pas une réalité (une photo instantanée), mais une succession, un empilement (un film) de réalités potentielles et évolutives qui, toutes implicitement contenues dans l'analyse, ne se manifestent et n'agissent qu'à tour de rôle, en fonction des occurrences passées, ces réalités potentielles futures pouvant même ne jamais apparaître. Un modèle dynamique comporte non seulement la succession de toutes les réalités à venir, mais aussi les nombreuses réalités potentielles qui ne surviendront peut-être jamais.

## II - 9 - Synthèse

Nous allons résumer les concepts présentés ci-dessus, en marquant en gras les mots clefs qui nous paraissent caractériser plus particulièrement notre démarche.

1) La Dynamique des Systèmes Complexes est avant tout une démarche (bien au delà d'une simple technique) destinée à étudier le mouvement, le changement, l'évolution, plus généralement le comportement de systèmes dont la structure et les frontières, bien que déterminées, peuvent être

changeantes, donc pas forcément connues d'avance. Ce n'est pas simplement un outil de simulation, encore moins un langage informatique, mais c'est tout de même une démarche pratique qui s'efforce d'aboutir à des résultats quantitatifs bien que pas forcément précis (analyses de tendance plutôt que prévisions exactes). Elle est donc associée à des outils de modélisation permettant de simuler les comportements que l'on désire analyser, comprendre, prévoir.

2) La priorité est donnée à l'analyse des facteurs (« forces ») qui causent ou qui s'opposent au changement (poussées, inerties, frottements), facteurs structurels qui sont rarement figés et qui peuvent évoluer en fonction de ces mêmes changements de l'état du système. Au-delà de la description du mouvement, nous cherchons à déterminer le pourquoi du changement. Notons que celui-ci peut être lent ou rapide, progressif ou au contraire brusque, mais nous considérons toujours l'avenir comme étant le résultat d'une suite de petits pas en avant, petits pas que nous nous efforçons de simuler en adoptant une approche continue. Ceci se situe à l'opposé d'une approche en simulation discrète où l'on saute des étapes dans le temps, lorsque ces étapes semblent - mais ceci peut n'être qu'une apparence - ne montrer aucun changement de l'état du système. Ce n'est pas non plus une approche qui est destinée à suivre individuellement chaque élément d'un système tout au long de la simulation (par exemple les diverses pièces numérotées d'un ensemble de production). La Dynamique des Systèmes Complexes, sans exclure les discontinuités tant structurelles que conjoncturelles, est basée sur l'analyse de l'évolution continue des phénomènes (ce qui sous-entend l'utilisation de techniques de simulation continue).

3) La complexité de comportement d'un système (entendons par là : imprévisibilité apparente, comportement spectral compliqué, dynamiques multiples) est due essentiellement à la présence de plusieurs - souvent nombreuses - boucles de rétroaction, boucles dont l'influence ne peut être que très difficilement perçue par l'être humain dès lors que le système est un tant soit peu compliqué : plus de trois boucles imbriquées, simultanément actives mais de constantes de temps différentes, et de plus comportant des relations non-linéaires entre variables. Nous venons de noter là deux concepts importants qui participent à la génération des dynamiques et surtout les rendent complexes : la notion de retard (sans retard ou délai, la plupart des événements seraient simultanés et leurs dynamiques en seraient bien simplifiées) et celle de non-linéarité qui complique bien les choses.

Et comme nous l'avons écrit précédemment, plus longue est la constante de temps de telles boucles, plus il est important d'en prendre conscience à l'avance ; car lorsque l'effet de ces boucles se fait sentir, la cause première a depuis longtemps disparu ou a été oubliée, et toute action ne peut constituer qu'un palliatif à une situation dont on ne maîtrise plus l'évolution.

Notons que la Dynamique des Systèmes Complexes a pour caractéristique d'être véritablement systémique, c'est-à-dire qu'elle permet - elle requiert même - la prise en compte de toute variable, quelle qu'en soit la nature, qui semble devoir influencer le comportement du système. C'est ainsi que les modèles correspondants peuvent prendre en compte des variables très diverses : physiques, économiques, financières, sociologiques, psychologiques et physiologiques, quantitatives et qualitatives, dont les influences mutuelles et les interconnexions, bien que rarement considérées dans leur ensemble, constituent l'une des principales causes des complexités systémiques.

## II – 10 – Positionnement de la Dynamique des Systèmes

On peut se poser la question de savoir comment se situe la Dynamique des Systèmes Complexes par rapport à quelques autres démarches ou techniques utilisées pour l'analyse de la réalité au sein de laquelle nous évoluons. Le schéma de la figure II.9 place la D.S. en relation avec quatre autres approches scientifiques :

- les tableurs
- l'Intelligence Artificielle
- la démarche appelée aux U.S.A. : System Thinking, qui correspond dans une certaine mesure à la Systémique qualitative
- les "hyper" complexités dont nous avons déjà parlé au § 1.2

Il est important de noter dans ce schéma, d'une part qu'il existe de nombreuses interconnexions, des interdépendances entre ces différentes branches de l'analyse de la complexité, d'autre part que la Dynamique des Systèmes comporte des éléments, des zones de spécificité par rapport aux autres démarches. Les mots-clefs notés sous Dynamique des Systèmes, résument ces spécificités : analyse

quantitative (à la différence de la démarche "systémique" ou de celle, assez en vogue dans les pays anglo-saxons, de « System Thinking ») de comportements complexes (complexité temporelle et non spatiale) dus à la présence quasi inévitable de boucles de rétroaction (difficilement prises en compte par l'I.A. dès lors que ces boucles apparaissent en assez grand nombre), dans un but d'application pratique de compréhension, de connaissance et d'action.

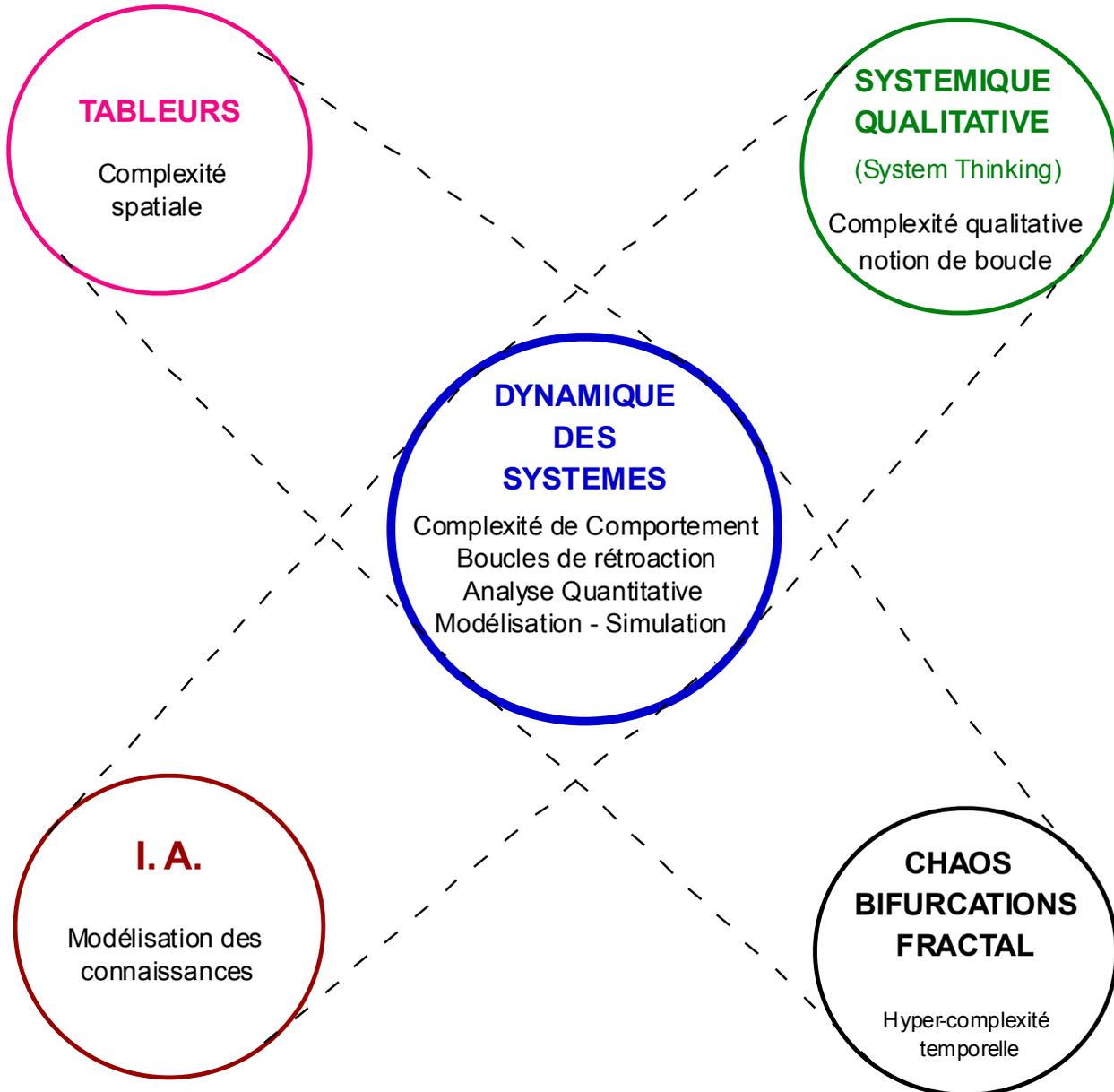


Fig. II.9

Il manque, dans le schéma ci-dessus, une autre démarche : l'économétrie, qui mérite qu'on s'y arrête plus particulièrement compte tenu des complémentarités mais aussi des différences et même des divergences entre les deux approches, exacerbées dans une certaine mesure par des rivalités presque personnelles entre les fondateurs ou les propagateurs de ces sciences. Une excellente analyse comparative de ces deux approches a été publiée, il y a déjà quelque temps, par Donella H. Meadows (cf ..... ) et nous suggérons au lecteur intéressé de s'y référer.

Voyons aussi ce qu'en dit un expert des deux démarches, Patrice Salini (cf ..... ) :

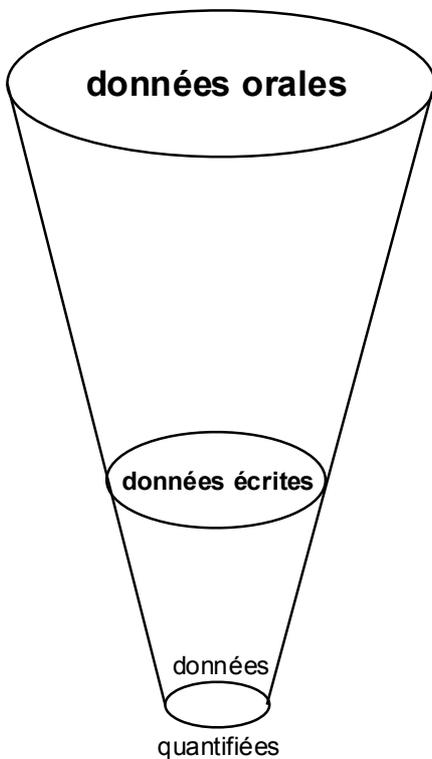
« Confronté à un problème, l'économétricien part en quête de données quantitatives, si possible sur longue période, pour établir des relations statistiques entre indicateurs (niveaux d'échanges, production, consommation, indices des prix, ...), relations souvent limitées, genre « log-log », assurant aux élasticités une belle constance qui revient à vouloir prévoir l'avenir en nous contentant de prendre en compte ce qu'il y a de stable (induction statistique) dans les relations mathématiques entre variables.

Plutôt qu'une aide à la compréhension, l'économétrie vérifie des corrélations et en tire des conséquences.

La Dynamique des Systèmes procède d'une logique différente. Il s'agit de décrire les systèmes et les interrelations entre les éléments, non de chercher à les résumer, à les synthétiser par un indicateur. Ce que l'on demande au dynamique des systèmes est radicalement opposé aux habitudes des économétriciens, en particulier leur quête du chiffre, obsession légitime, qui va laisser la place à la quête de la connaissance, à ce que Jay Forrester appelle la construction d'un « modèle verbal » permettant de comprendre ce qui se passe dans le système, c'est-à-dire de se livrer à une analyse causale. On passe ainsi de l'apparence des choses, à leur structure. »

Il nous paraît utile de développer quelque peu cette notion de modèle verbal, en explicitant un schéma en cône inversé proposé par Jay Forrester.

Que ce soit dans les sciences qu'il est convenu d'appeler « exactes » ou dans celles dont on dit qu'elles sont floues, toutes les décisions sont prises à partir d'informations de trois sortes :



1) les informations quantifiées - données numériques, data, etc. - relativement peu nombreuses, objectives en principe mais pas toujours fiables (même dans les sciences exactes) et dont le contenu informationnel est parfois assez pauvre. Leur succès provient de ce qu'elles se prêtent bien au traitement par ordinateur, même si une fraction seulement des traitements et analyses possibles (regroupement des données, filtrage, quantification) sur ces informations "numérisables" ait été réalisée à ce jour.

2) le mot écrit, bien plus fréquent, plus riche en information, mais au niveau duquel il est difficile de pratiquer une mesure exacte. La subjectivité inhérente à ce type de "donnée" enrichit le contenu mais ne permet de l'appréhender que d'une manière floue (pour laquelle existent des techniques d'analyse et d'exploitation appropriées).

3) la parole - expression orale - de loin la source d'information et de décision la plus ancienne et la plus fréquemment rencontrée. Abondante, redondante, éphémère et bruitée, elle est aussi la plus entachée d'incohérence et de désordre. Pourtant, à condition d'avoir les moyens d'analyser de telles données hautement subjectives, en filtrant en particulier le bruit, la redondance et les biais divers, on peut espérer accéder non seulement à la réalité actuelle que reflètent ces informations, mais encore aux souhaits, aux préoccupations, espoirs et désirs rarement exprimés par écrit alors même qu'ils sont porteurs d'un fort contenu décisionnel et prospectif.

C'est donc l'ensemble de ces « données », quantifiées, écrites et orales que nous essayerons de prendre en compte pour l'analyse des comportements possibles d'un système.

Ceci nous amène à faire une remarque importante, destinée à contredire certaines habitudes. Contrairement aux études économétriques qui sont basées dès le démarrage de l'étude sur des données statistiques, une analyse par la Dynamique des Systèmes ne doit pas commencer par une recherche de données, mais par une mise en évidence des variables qui paraissent à première vue importantes, variables qui seront reliées entre elles par un ensemble de relations d'influences qui constitueront le schéma causal du système. Alors seulement, c'est-à-dire au cours de la modélisation quantitative, on pourra analyser les liaisons, réfléchir aux influences importantes, chercher à les quantifier ... et constater souvent qu'aucune statistique existante ne permet de répondre aux questions de quantification ainsi soulevées. Il faudra alors -

et nous y reviendrons - générer de nouvelles analyses statistiques et surtout faire appel à l'expérience des « experts » du problème, expérience qui correspond aux « données orales » décrites ci-dessus.

### III - Le Processus et les Étapes de la Modélisation Dynamique

Le schéma qui suit (Fig. III.1.1) résume les étapes habituelles du processus d'analyse d'un système complexe, ce que nous appelons réalité.

Ce graphique montre :

- les étapes de travail : analyse causale, modélisation, simulation.
- l'apport essentiel de chaque étape : perception ordonnée du problème, compréhension structurelles, connaissance détaillée, ...
- les rétroactions possibles du travail d'analyse sur la connaissance du système ou sur la réalité elle-même.

#### III - 1 - L'Analyse Causale (modélisation qualitative)

D'une manière générale, la Dynamique des Systèmes est utilisée lorsqu'on devient conscient qu'une structure, un problème, deviennent trop complexes pour en comprendre facilement les comportements passés, présents, et surtout à venir. On se rend compte que l'intuition hésite, que les risques d'erreur de jugement deviennent importants, que les données disponibles et surtout utiles sont insuffisantes. On cherche à mettre à plat l'ensemble des éléments du problème - ce que nous appelons les variables du système -. C'est l'étape d'analyse causale, ou d'analyse structurelle (structure des relations d'influence entre variables, paramètres et données) du problème posé, analyse dont l'apport essentiel est de permettre une perception et une représentation ordonnée du système.

A ce stade, quelques remarques pratiques pourront faciliter la réalisation de ces diagrammes causaux et éviter des blocages ou certaines erreurs.

Comment fait-on ? Quelles variables prendre en considération ?

Il faut se poser la question - ou poser la question aux spécialistes du problème considéré - des variables qui peuvent, à un moment ou à un autre de l'évolution du système, influencer la variable considérée. A ce stade de l'étude, il n'est pas utile d'essayer d'être exhaustif, ce serait une perte de temps, les variables et les influences manquantes s'imposeront au cours de la phase de modélisation et surtout de simulation.

Il ne faut pas perdre de vue que, pour tout problème réel (stratégie d'entreprise, économie, management, etc.) posé par un décideur et faisant appel à plusieurs expertises (expert financier, spécialiste de logistique, de productique, DRH, responsable de marketing, etc.), un diagramme causal comportera souvent entre 100 et 200 variables.

Placer un tel nombre de variables sur une seule page est quasi-impossible et, de toute manière génère chez le lecteur d'un tel schéma une réaction de rejet qui risque d'être définitive. Il faut donc séparer et présenter le diagramme complet sous la forme de plusieurs schémas comportant chacun entre 15 et 20 variables, en insistant sur le fait que ces diagrammes sont interconnectés entre eux (certains logiciels permettent de montrer facilement l'interconnexion implicite de plusieurs pages de diagrammes causaux).

Ainsi, nous conseillons de ne pas trop dépasser, en complexité sur une seule page, un diagramme comme celui de la figure III.1.2, décrivant les principales variables qui intéressent les distributeurs d'un produit et qui ont pour eux une signification. Naturellement, d'autres diagrammes détailleront le fonctionnement des variables de ce diagramme de principe ou mettront en évidence, par exemple, les notions de concurrence.

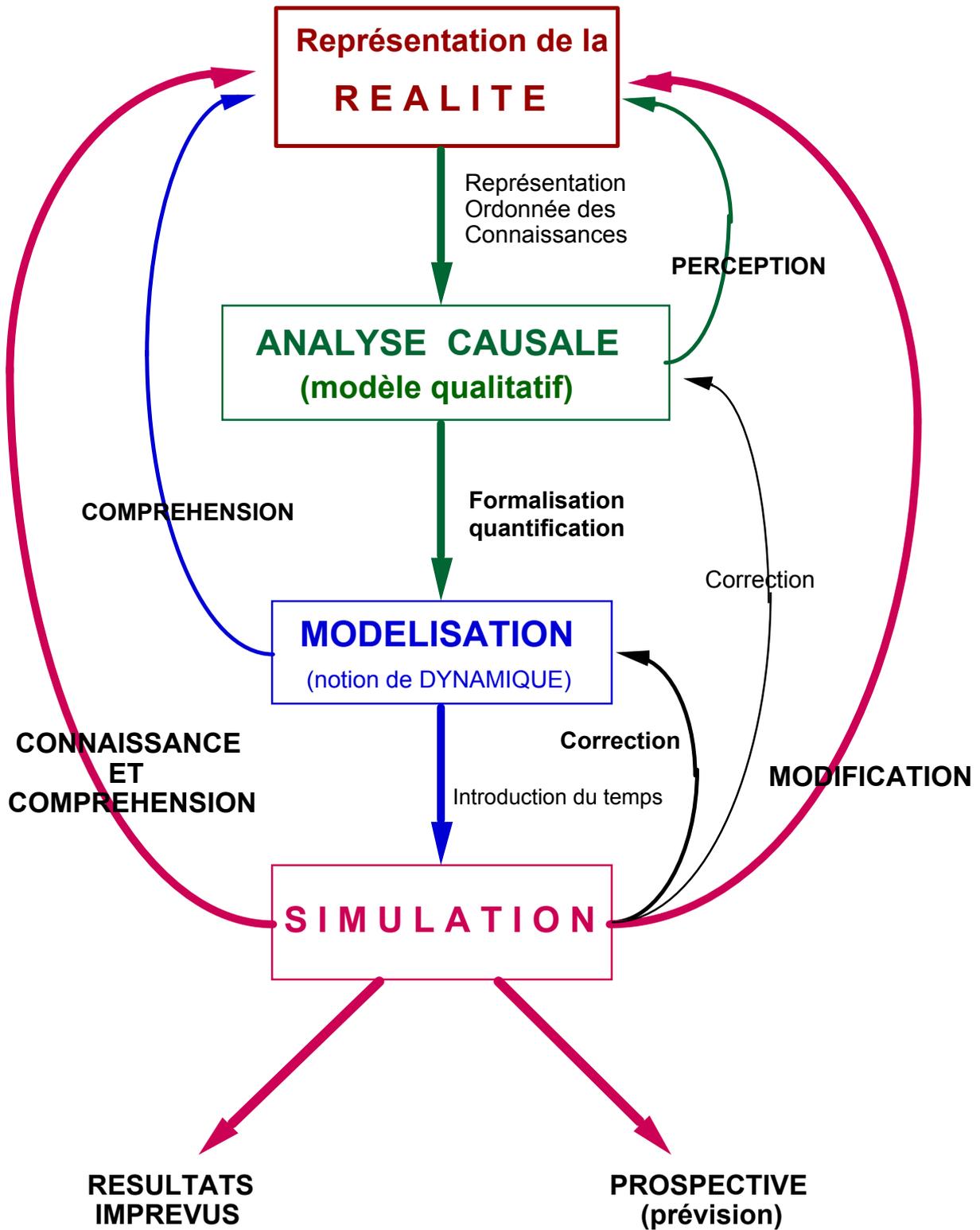


Fig. III.1.1

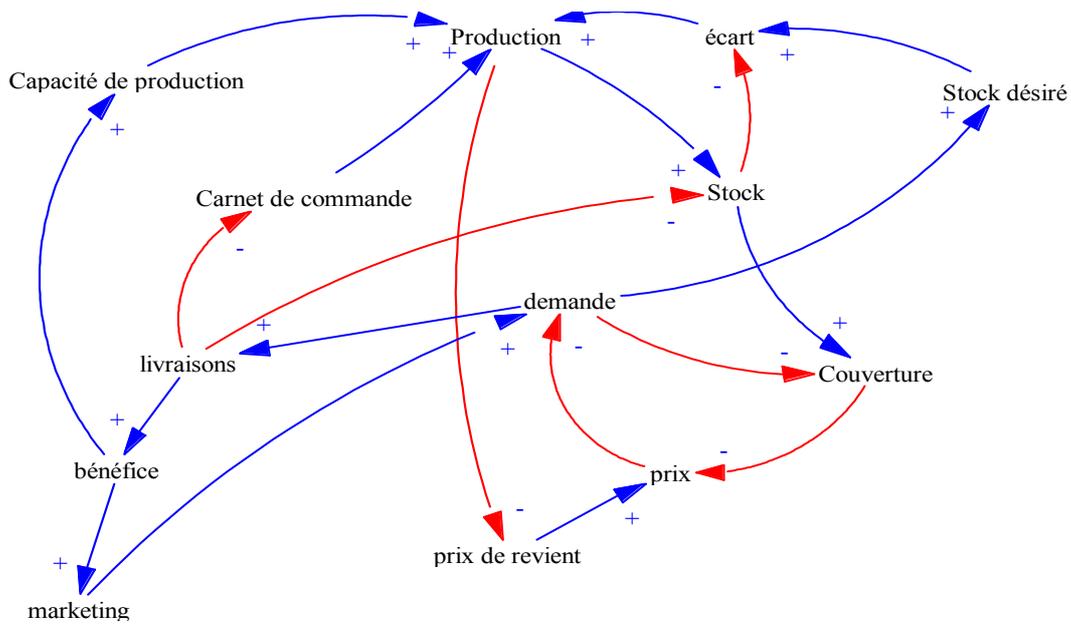


Fig. III.1.2

Le diagramme ci-dessus, illustrant les variables essentielles d'un processus de gestion de stock en entreprise, peut paraître assez simple, pourtant il contient déjà un nombre non négligeable de boucles de rétroaction. Certains logiciels (VENSIM en particulier) ont la possibilité de montrer, pour chaque variable désignée, les boucles et leur chemin, c'est-à-dire les variables qui interviennent dans ces boucles.

Ainsi, pour le schéma précédent, on trouve que la variable CARNET DE COMMANDE intervient dans 8 boucles (de longueurs diverses), que les STOCKS interviennent dans 15 boucles, que par la variable PRIX passent 26 boucles (nous laisserons au lecteur le soin de les retrouver), 25 boucles par la variable DEMANDE et 23 boucles par la PRODUCTION (nombre de ces boucles passant par ces diverses variables sont naturellement les mêmes ; il y a sans doute au total de l'ordre d'une trentaine de boucles, ce qui, pour un schéma aussi simple, est déjà impressionnant).

Pour revenir à la notion de complexité des diagrammes causaux, l'exemple suivant montrera l'intérêt qu'il peut y avoir à ne compliquer que progressivement l'exposé... et les diagrammes correspondants. Le schéma précédent décrivait le processus de production - vente d'un produit. Si l'on a deux produits en concurrence (par exemple, deux modèles de voiture d'un même constructeur, en concurrence chez un distributeur de cette marque), le schéma causal devient le suivant :

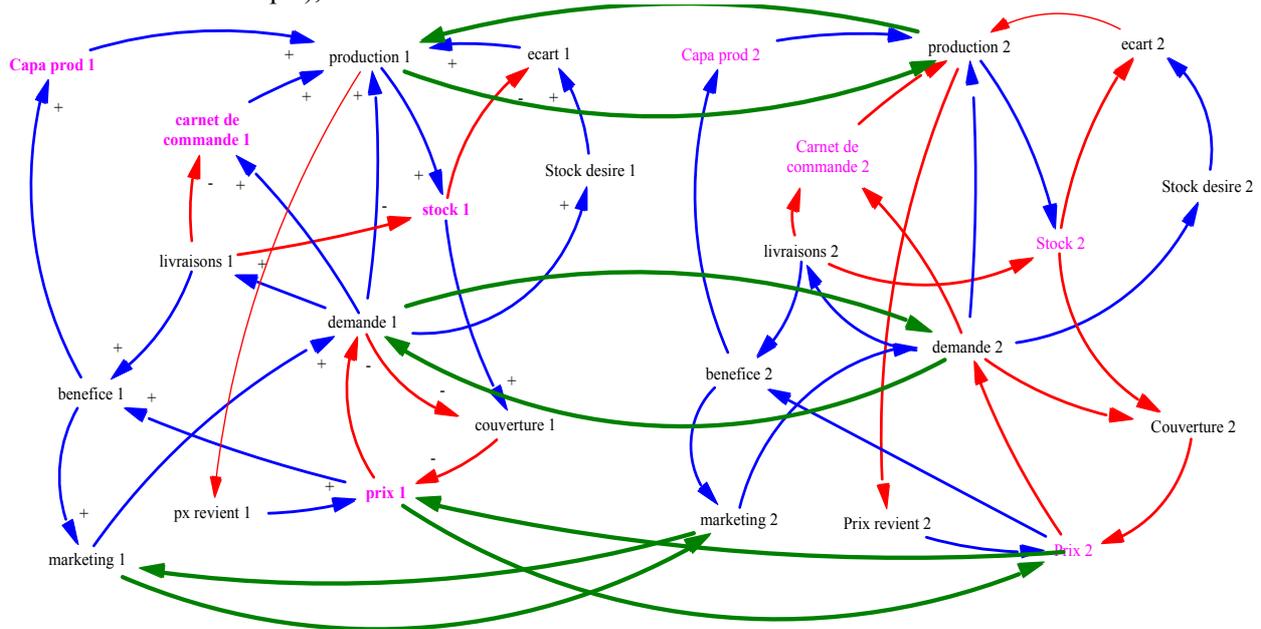


Fig. III.1.3

Montrée telle quelle, sans « préparation », la figure ci-dessus est pour le moins rebutante et difficilement compréhensible. Pourtant, si ce diagramme est montré comme un développement du schéma qui le précède et qui a été auparavant expliqué (production/demande/stock/fabrication/prix d'un produit), il devient assez aisé de le comprendre et d'en analyser les flèches causales nouvelles, montrant la concurrence potentielle vis à vis des prix, de la demande, du marketing et de la production. Au-delà du « copier/coller » permettant de montrer côte à côte les deux produits, seules les flèches vertes symbolisant cette concurrence ont été ajoutées, ce qui rend ce diagramme, venant après le premier, bien plus compréhensible.

Mais si l'on tente de dénombrer le nombre de boucles dans ce nouveau schéma (en utilisant de préférence un logiciel adéquat), on trouve un nombre effarant qui explique que ce problème de concurrence ne soit toujours pas résolu dans sa généralité. Ainsi, par chacun des STOCKS, passent quelques 120 boucles, il en passe 295 par chacune des DEMANDES, et même les CARNETS DE COMMANDE se retrouvent chacun dans 56 boucles (rappelons qu'il ne faut pas additionner toutes ces boucles, car nombre d'entre elles passent par plusieurs des variables citées. Au total, Il y a probablement dans ce dernier schéma environ 300 à 350 boucles. C'est déjà pas mal !).

Il peut être utile, pour des raisons à la fois didactiques, et de facilité de compréhension et d'analyse du système étudié, de faire ressortir certaines de ces nombreuses boucles, en utilisant les possibilités correspondantes de logiciels tels que VENSIM. Toutes les boucles en question, en effet, sont ou peuvent devenir actives à un moment ou à un autre de l'évolution de la structure modélisée, et la décomposition boucle par boucle aide à comprendre certains comportements, en montrant comment les effets des diverses boucles peuvent se combiner, s'ajouter ou au contraire se neutraliser. L'analyse individuelle de ces boucles donne une idée qualitative des comportements probables des variables constituant chacune de ces boucles, et peut permettre de voir rapidement les avantages possibles ou au contraire les inconvénients de certaines politiques, de certaines décisions.

Lors de l'analyse de ces boucles, il ne faut pas perdre de vue que l'effet de chaque flèche causale est à considérer « toutes choses égales par ailleurs », sachant que dans la réalité, les choses ne sont jamais « égales par ailleurs », et que la complexité que nous essayons de comprendre est justement due à l'interconnexion et les multiples influences mutuelles des relations causales imbriquées dans de nombreuses boucles. C'est toutefois ce « toutes choses égales par ailleurs » qui nous permet de décomposer un schéma causal complexe en éléments simples, c'est-à-dire en boucles élémentaires que nous pouvons analyser une à une.

Donnons un exemple :

A la demande de deux entités (PREDIT et ADEME) du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, un modèle a été réalisé concernant le développement du transport de marchandises en France, et l'influence sur ce système de transport de la création de « permis d'émission (de CO<sub>2</sub>) négociables ». Le modèle correspondant est assez conséquent et, pour faciliter la compréhension, il a été résumé en un diagramme causal d'une page (Fig.III.1.4)



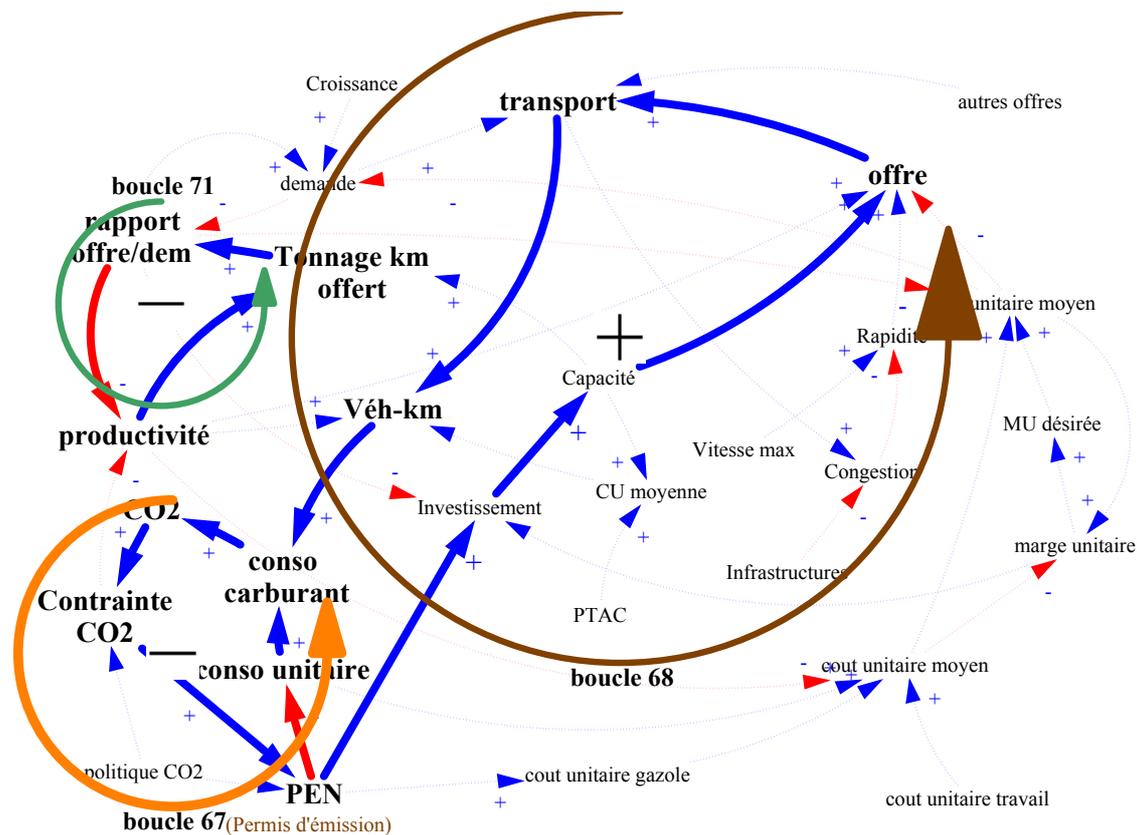


Fig. III.1.5

Remarque : le schéma causal ci-dessus a été réalisé a posteriori, c'est-à-dire après la réalisation et la validation du modèle dynamique. Nous avons constaté qu'une explication causale ainsi qu'une décomposition par boucles, basée sur un modèle complet et validé, peut être très utile pour générer une meilleure compréhension des comportements possibles du système analysé. Un tel diagramme causal, basé sur un modèle dont on est à peu près sûr, permet de mieux faire participer les destinataires de l'étude, les décideurs, à l'analyse du pourquoi des comportements qui ne paraissent pas évidents.

Pour revenir à la constitution d'un schéma causal, faut-il prendre en considération toutes les variables suggérées par les « experts » des différents aspects du problème ? On est souvent confronté au dilemme suivant : prendre en compte des variables que l'on sent être peu utiles à la compréhension des dynamiques de comportement du système, au risque d'alourdir l'étude, ou mécontenter un ou plusieurs des « experts » consultés, au risque d'amoindrir la crédibilité du modèle et d'en bloquer l'utilisation ultérieure.

Nous avons souvent constaté que nombre de variables considérées par les « experts » comme essentielles, finissaient par se montrer effectivement inutiles et être rejetées par ces mêmes « experts ». La politique que nous conseillons d'adopter consiste donc, au risque d'alourdir momentanément l'étude, à ne rejeter aucune des variables suggérées initialement, sous réserve qu'elles ne paraissent logiques et plausibles, sachant que nombre de ces variables disparaîtront d'elles-mêmes au cours du processus de modélisation-simulation.

Par où commencer ? S'il se confirme que la Dynamique des Systèmes est bien la démarche appropriée pour l'étude du système considéré, cette question n'a pas de véritable importance. Notre système, en effet, comporte certainement un grand nombre de boucles de rétroaction, et quelle que soit la variable de départ de l'analyse causale, on reviendra nécessairement à cette variable, en passant par toutes ou presque toutes les variables du schéma. Donnons un premier exemple simple, dans le domaine de l'évolution d'une population quelconque.

On peut, et c'est le processus le plus logique, commencer par la POPULATION et lister les variables influençant directement cette population. Nous avons deux influences directes : les NAISSANCES et les DECES, et ce début de schéma causal se présentera ainsi :

On voit bien que ces trois schémas sont identiques et que seuls des critères « commerciaux » (à qui veut-on plaire ?) permettront de choisir.

Prenons un autre exemple, dans le domaine, déjà un peu effleuré, d'un marché de matières premières. Un diagramme causal simple sera de ce type :

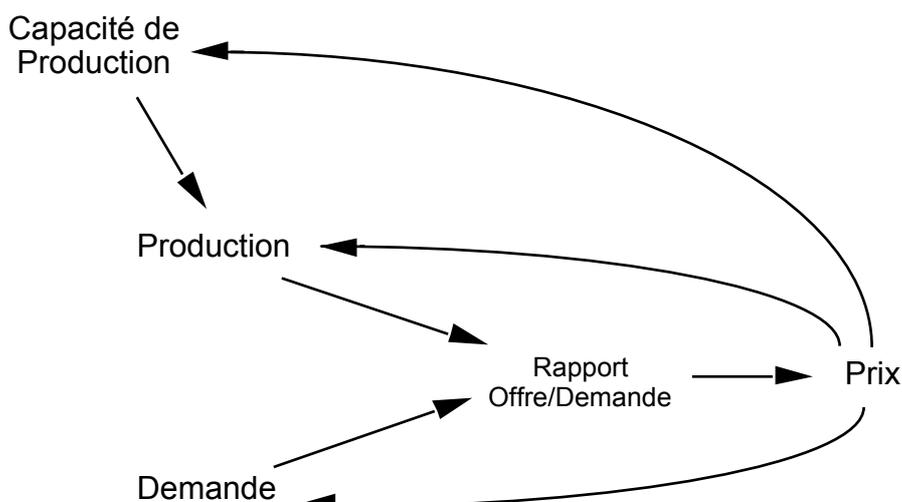


Fig. III.1.4

Dans ce diagramme, le prix apparaît comme la variable essentielle, influencée par l'offre et la demande, mais influençant à son tour la production, la demande et la capacité de production.

En fait, on pourrait redessiner ce schéma en partant de la production, ou de la demande, ou de la capacité de production, comme suit :

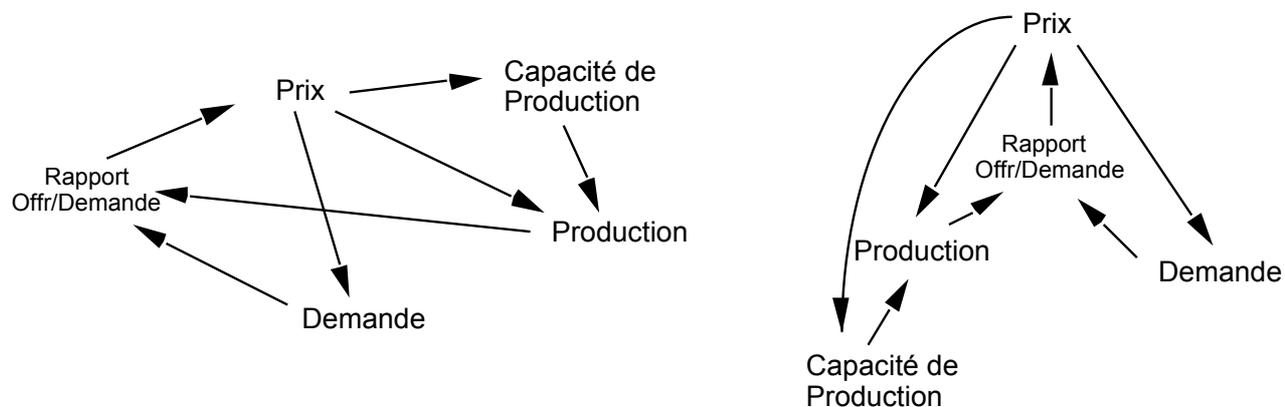


Fig. III.1.5

Y a-t-il des variables plus significatives que d'autres ?

La réponse réside naturellement dans la notion de boucle. D'une façon générale, les variables auront d'autant plus d'importance qu'elles risquent d'avoir un rôle inattendu, retardé, parfois contre-intuitif. Et ce sont les variables faisant partie d'une structure bouclée qui peuvent avoir un tel rôle, générer un tel effet.

L'Analyse Causale, première étape de toute analyse systémique, permet donc de structurer un problème, mais aussi de le décomposer en sous-ensembles, en éléments simples destinés à être analysés individuellement. C'est une phase indispensable qui enrichit énormément la perception globale du "système" étudié, tout en générant une impression de plus en plus forte, parfois inquiétante et même déstabilisante, de complexité des phénomènes. Plus on développe l'analyse structurale, forcément qualitative (les chiffres qui caractérisent la connaissance sont absents d'une telle analyse qui reste par essence qualitative), plus on se rend compte de la complexité des choses et des comportements. Les uns voudront poursuivre, approfondir leur connaissance et leur compréhension des phénomènes, d'autres, effrayés par une telle complexité, s'arrêteront à l'analyse qualitative des phénomènes.

A supposer qu'il soit arrêté à ce stade - ce qui arrive parfois -, le travail d'analyse qualitative aura rendu les participants sans doute plus sages, plus humbles, mais plus perturbés aussi, et il n'aura guère apporté de connaissances nouvelles précises et peu de compréhension quant à la dynamique des phénomènes passés ou futurs.

### III - 2 - La Modélisation

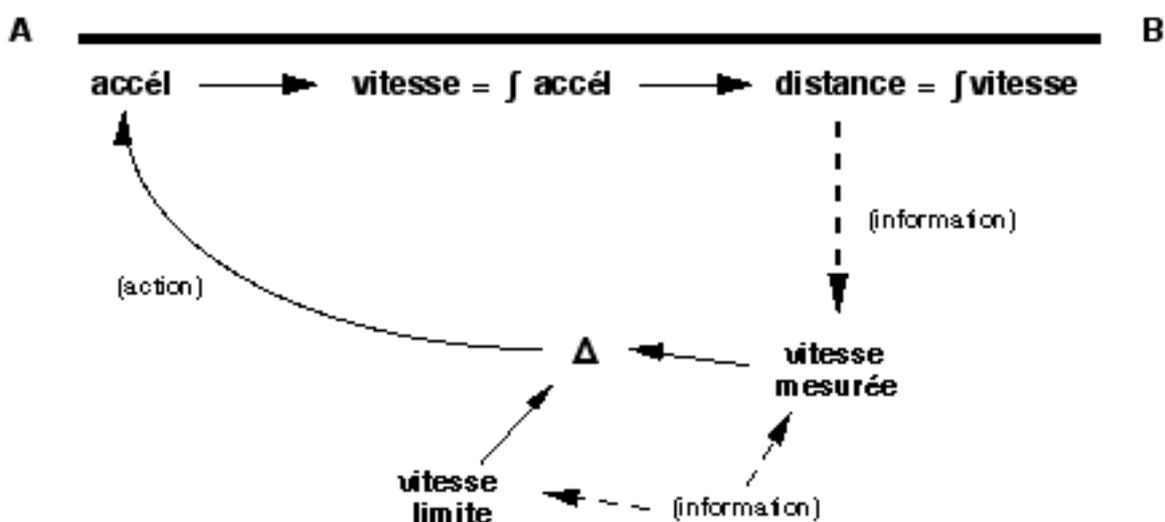
Après la phase qualitative d'analyse de causalité structurale, vient la phase de modélisation. Si l'on se souvient que le but premier de tout ce travail est de connaître l'évolution en fonction du temps d'un système, on comprendra que l'on cherche à formaliser le problème d'une manière qui soit adaptée à ce but.

En d'autres termes, on veut définir les équations différentielles qui puissent représenter un système en mouvement.

La résolution numérique d'un système d'équations différentielles est chose connue depuis longtemps. Toutefois dans le domaine des sciences sociales, un tel système d'équations différentielles, s'il peut formaliser correctement une structure dont on veut analyser le comportement, ne représente pas grand chose de réel. Une équation différentielle s'obtient en dérivant les variables et en résolvant l'équation (différentielle) reliant ces dérivées entre elles. Dans la nature, par contre, les effets ont plus tendance à s'accumuler qu'à provenir d'un processus de dérivation ; une vitesse, lorsqu'elle est mesurée comme la dérivée d'une distance parcourue en un temps donné, est une information ; par contre, ce n'est pas cette information qui fait bouger, mais bien la variable physique « vitesse » qui résulte d'une l'accélération et qui est la cause de la distance parcourue.

Précisons quelque peu notre pensée à l'aide d'un exemple.

Pour aller d'un endroit à un autre, on parcourt une distance grâce à la vitesse acquise qui elle-même résulte de l'accélération donnée au véhicule (notions d'intégrale, d'accumulation).



**Fig. III.2.1**

D'un point de vue causal, la vitesse ne résulte pas de la distance parcourue, c'est au contraire la distance qui dépend de la vitesse. On mesure toutefois la vitesse à laquelle on roule (vitesse mesurée) en dérivant la distance - c'est là le rôle du compteur de vitesse -. Si cette vitesse, qui est une information, est supérieure à une vitesse limite, qui est une autre information, on peut être amené à réagir en diminuant l'accélération (freinage). La causalité du mouvement "monte" de l'accélération vers la distance parcourue, mais des rétroactions peuvent exister, passant par des variables d'informations pouvant être instantanées, retardées, dérivées, etc.

Un des principes constants de la Dynamique des Systèmes Complexes étant de ne représenter, dans toute la mesure du possible, que des relations correspondant à une réalité tangible, à une causalité effective et clairement perçue, nous choisirons de représenter la notion d'accumulation, d'intégrale plutôt que celle de dérivée. Nous écrivons un système d'équations intégrales, laissant l'ordinateur, au moyen de logiciels appropriés, simuler la résolution d'un système d'équations différentielles (en réalité un ensemble d'équations intégrales).

Nous ne décrivons pas en détails la symbolique utilisée, qui a parfois été décrite comme trop simpliste. Rappelons seulement que la séparation des variables d'un système en variables d'état (qui résultent de phénomènes d'accumulation) qu'on appelle parfois « niveaux » par référence au niveau de liquide dans un récipient, en flux de "matière" (cette matière pouvant être une quantité ou même une qualité d'information, de l'argent, des décisions, etc.), en informations correspondantes et en variables de décision, représente bien la réalité physique telle qu'elle est mais surtout telle qu'elle se perçoit assez aisément par ceux auxquels s'adresse le travail de simulation.

Nous pensons toutefois utile de montrer le processus de réflexion qui est à la base de la modélisation en Dynamique des Systèmes et qui permet de démarrer la formalisation de tout problème nouveau. C'est en effet cette phase de démarrage qui pose souvent problème au modélisateur débutant.

Nous proposons une décomposition en trois étapes :

1 - Partant d'un schéma causal, choisir les variables qui paraissent être des variables d'accumulation (variables d'état). Le critère de choix est simple : une telle variable a pour particularité de rester figée lorsque, pour une raison ou une autre, le fonctionnement du système s'arrête ou tout au moins on s'imagine qu'il s'arrête ("le temps se fige").

Exemples :

1.1 - pendant les vacances du mois d'août en France, la majeure partie de l'activité industrielle s'arrête. Production et consommation tombent à zéro (au moins en ce qui concerne les biens industriels), mais stocks, carnets de commande, capacités de production (usines) se figent à la dernière valeur acquise lors de la période d'activité. Même les prix, bien que devenus provisoirement « inutiles », restent figés à leur valeur du 31 juillet. Ce sont là des variables d'accumulation que l'on pourra faire ressortir sur le diagramme causal, par exemple sur celui de la figure III.1.2 que l'on renommera III.2.2.

1.2 - Lorsqu'on arrête de la remplir, le niveau d'eau dans une baignoire reste constant. De plus, on ne peut la vider instantanément, à l'inverse d'une douche dont on peut arrêter à tout instant et sans délai le débit. Ce niveau est donc une variable d'accumulation (on utilise aussi le terme "variable de niveau" qui peut se comprendre aisément en référence à l'exemple de la baignoire).

1.3 - Dans le domaine plus inhabituel des relations psychosociologiques, des variables comme l'inhibition, les cognitions, les niveaux d'appartenance, la satisfaction cumulée, etc. sont des variables d'accumulation qui ne peuvent s'annuler ou changer de valeur brutalement.



quoi, n'importe comment. D'autre part sa progression peut être lente, car à ce stade interviennent les difficultés de quantification.

La recherche, en effet, des éléments - paramètres, variables, relations non-linéaires - qui participent à la génération du mouvement, est inhabituelle et fait appel à des données qui souvent ne sont pas connues, ne font pas partie des statistiques disponibles. Ces dernières résultent plutôt d'une tendance à la décomposition et à la représentation spatiale que d'une recherche de causalité de comportement. Les statistiques décrivent une situation, éventuellement une série de situations en évolution, mais ne sont pas destinées à déterminer les causes d'une telle évolution. Elles répondent à la question : combien mais restent muettes devant la question comment. Par contre la Dynamique des Systèmes Complexes, dans sa recherche de causalité qui est une de ses raisons d'être, fait appel à des notions et des relations nouvelles qui nécessitent, plutôt que des données, des connaissances souvent difficiles à obtenir car représentant avant tout l'expérience des personnes compétentes (experts, spécialistes, décideurs), des connaissances se forgeant essentiellement au niveau de leur modèle mental (voir cône des connaissances décrit plus haut).

Constituant une phase ardue, relativement lente et peu glorifiante du travail, la modélisation oblige à une nouvelle représentation de la réalité, une représentation inhabituelle, souvent rejetée comme non quantifiable donc inutile, alors même que tout comportement dynamique provient justement de l'existence - quantifiable mais non mesurée - de ces relations insoupçonnées. Le processus de modélisation reste donc indispensable si l'on veut aller au-delà de la seule analyse causale qualitative des phénomènes, et rendre compte de dynamiques complexes de comportement.

Pour montrer le processus de démarrage d'un modèle, prenons comme exemple le schéma de la figure III.2.2. Nous avons fait ressortir sans peine quatre variables d'accumulation :

- Les Stocks
- Le Carnet de Commande
- La Capacité de Production
- Les Prix

Il est devenu habituel (mais là aussi, rien ne nous y oblige) de représenter de telles variables par des rectangles (graphiquement, c'est ce que font les logiciels spécialisés en modélisation et simulation Dynamique).



La question suivante est : quels sont les flux qui remplissent ou qui vident cette variable d'accumulation ? Dans un premier temps, la réponse est assez facile : les stocks sont remplis par le flux de production, vidés par la livraison du produit correspondant ; le Carnet de Commande est augmenté par la demande, vidé par la livraison, etc.

Schématiquement, cela donne le dessin suivant :

Remarque : les petits nuages aux extrémités des flux symbolisent une source ou un puits pour les flux correspondants, ils déterminent en quelque sorte les frontières du système étudié.

Il ne s'agit pas là seulement de dessins, mais bien de symboles de comportement dynamique pris en compte par les logiciels utilisés. Ainsi en dessinant ces deux petits diagrammes ci-dessus, on sait - et les logiciels le savent aussi, et le mettent en mémoire - que le stock intègre à chaque instant la différence entre les flux entrants de production et les flux sortants de vente, et que le carnet de commande en fait de même avec demande et livraison.

La réalité sera plus complexe : il n'y aura aucune livraison si le stock est vide, ce qui influera aussi sur le carnet de commande, sans doute sur les ventes et peut-être aussi sur la production. Ce sont ces relations d'information, de décision, d'influence que nous devons dessiner, formaliser, quantifier... et simuler.

Prenons un premier exemple simple, intuitif : le remplissage d'une baignoire.

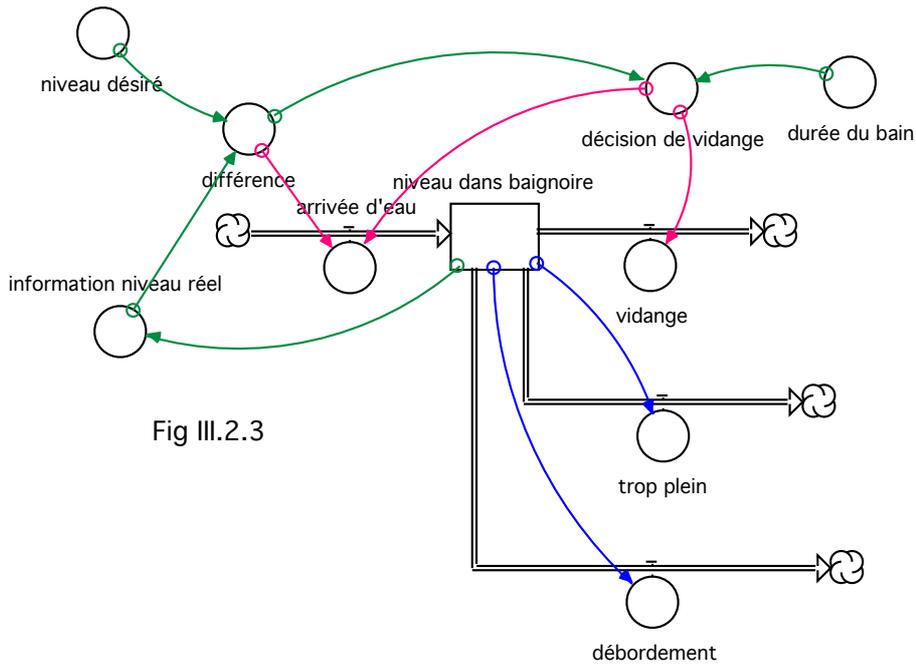


Fig III.2.3

Ce schéma peut paraître bien compliqué, concernant un processus que l'on gère à peu près quotidiennement ! Il n'est relativement complexe que parce qu'il tient compte et représente une série d'informations, de décisions et d'actions qui, pour la plupart, n'apparaissent que de manière successive (en général, on ne remplit pas une baignoire en même temps qu'on la vide), mais parfois simultanée, et parfois jamais (le flux de débordement de la baignoire n'est représenté que parce que c'est là un événement possible, mais il est à espérer que ce flux et les relations correspondantes resteront toujours nulles). A un instant donné, seules deux ou trois de ces variables fonctionneront, c'est-à-dire auront une valeur non nulle, mais toutes ces variables doivent être « prévues » pour éviter, de temps à autre, un résultat aberrant tel un niveau d'eau infini dans la baignoire (trop plein oublié et débordement omis).

En quelque sorte, ce type de schéma symbolise la transformation d'une complexité temporelle (multiples futurs possibles à partir d'un seul passé et d'un seul présent) en une complexité de représentation spatiale.

Analysons brièvement ce schéma.

L'arrivée d'eau dans la baignoire est réglée par le robinet correspondant (la vanne « arrivée d'eau » du schéma) à partir d'une information sur la différence entre le niveau désiré et l'information du niveau réel. Dans le cas présent, on peut supposer qu'information et réalité sont identiques, mais ce ne sera pas toujours le cas : nous avons déjà fait remarquer que l'information est souvent entachée d'erreur (systématique, aléatoire, voulue ou pas...). L'information différence sera donc utilisée pour gérer l'arrivée d'eau, selon une relation à définir : fermeture progressive du robinet par une personne prudente, fermeture abrupte dans le cas contraire, parfois même oubli de fermeture... et débordement.

La décision de vidange pourra provenir de l'extérieur du modèle, mais plus probablement d'une décision de sortir du bain un certain temps (durée du bain) après qu'on y soit entré, quand le niveau d'eau a atteint le niveau désiré. Cette décision affectera la vidange et, éventuellement (si l'on veut sortir de la baignoire avant d'avoir fini de la remplir) l'arrivée d'eau.

Par ailleurs, le flux allant dans le trop plein est fonction du niveau d'eau dans la baignoire... et de l'emplacement du trop plein. Celui-ci ne devrait s'ouvrir, là aussi, que si le robinet d'arrivée d'eau est mal programmé.

Enfin, nous avons prévu la possibilité de débordement.

Ce schéma montre combien il est à la fois facile, mais aussi nécessaire, de prendre en compte et de mélanger des variables et des relations de types différents : flux et relations physiques, informations, décisions. Nous avons utilisé les couleurs, en plus des symboles propres au logiciel utilisé, pour différencier

les relations : les doubles flèches en noir pour les flux physiques, les flèches rouges pour les décisions, les vertes pour les relations informationnelles, les bleues pour les liaisons mathématiques ou physiques (par exemple, la quantité d'eau évacuée par le trop plein est proportionnelle à la quantité qui se trouve en trop au-dessus du niveau de ce trop plein).

Cette description du remplissage et vidange d'un bain par la Dynamique des Systèmes montre :

1 - qu'on peut par cette démarche et avec l'aide de logiciels qui nous facilitent la tâche, modéliser tous les processus évolutifs dans le temps.

2 - que la description correspondante peut paraître compliquée uniquement parce qu'elle tient compte et met en évidence toute la chronologie des événements possibles, y compris les plus invraisemblables mais non impossibles (ex : débordement de la baignoire).

3 - que cette démarche a pour particularité et énorme avantage de permettre, d'obliger même à prendre en considération des variables de natures très diverses et qui ressortent de disciplines n'ayant que peu de liens entre elles. C'est là une démarche systémique.

Avant de passer à un problème plus « sérieux », tel un marché de matières premières, compliquons un peu le problème de la baignoire en ajoutant la modélisation de la température de l'eau du bain. Comment procéder ? Quelle variable semble a priori la plus importante ?

Une première réponse est évidente : il faut partir de la température du bain. Celle-ci sera une fonction des températures d'eau froide et d'eau chaude, pondérée par les quantités respectives de ces eaux. Le réglage des robinets froid/chaud sera déterminé par la comparaison entre la température désirée et la température effective du bain, et aussi par une comparaison entre le niveau d'eau et le niveau désiré. Pour être à peu près réaliste, on prendra en compte le fait que l'eau chaude n'arrive pas tout de suite...

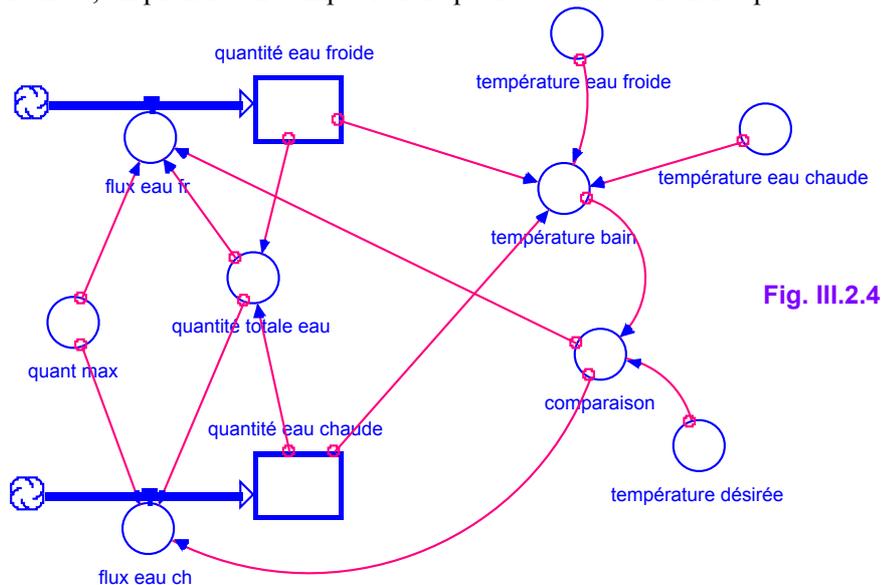


Fig. III.2.4

Encore une fois, on constate que le modèle semble bien compliqué pour une représentation d'un événement quotidien. Il y a à cela plusieurs raisons sur lesquelles il nous paraît à la fois intéressant et utile d'insister :

1 - Là encore, le modèle est censé pouvoir représenter « tous » les futurs prévisibles, ce qui implique la prise en compte de certaines données et relations qui ne devraient presque jamais être utilisées ni mises à contribution. Dans le cas du remplissage d'une baignoire, par exemple, un débordement est chose rare, mais ne pas introduire cette possibilité risque de nous donner parfois ...des baignoires de capacité infinie !

2 - Cette réalité nous paraît simple car elle est quotidienne. Mais quelqu'un qui n'aurait jamais pris un bain et qui ne saurait pas ce qu'est l'eau chaude, aurait du mal, au début, à réguler la température du bain. L'expérience peut certes palier à l'absence d'un modèle. Mais dans les processus complexes et rarement répétitifs – économie, management, stratégie d'entreprise ou de production, etc. – quel dirigeant, quel expert, qui d'entre nous a suffisamment d'expérience pour se passer d'aide à la réflexion et à la décision ? En fait on peut dire qu'un modèle peut nous permettre de raccourcir, de condenser le temps qu'il faut pour acquérir l'expérience de la dynamique de comportement d'un processus réel.

3 - Dans notre exemple, les constantes de temps sont rapides, ce qui nous donne la possibilité de réagir (mais que de fois on se brûle, ne fut-ce que brièvement, ou au contraire on a trop d'eau froide dans un bain ou sous une douche !). Dans les domaines économiques et autres, auxquels s'applique en général la Dynamique des Systèmes, les constantes de temps sont longues (plusieurs mois ou plusieurs années), et lorsqu'on réagit, il est souvent beaucoup trop tard.

4 - Le modèle ci-dessus paraît complexe (les suivants le seront bien plus) mais un ordinateur d'aujourd'hui traitera les deux modèles combinés (quantité d'eau et température) en une fraction de seconde.

Pour terminer avec cet exemple simple, voyons comment se comporte le facteur température du bain lorsqu'on fait tourner le modèle ci-dessus.

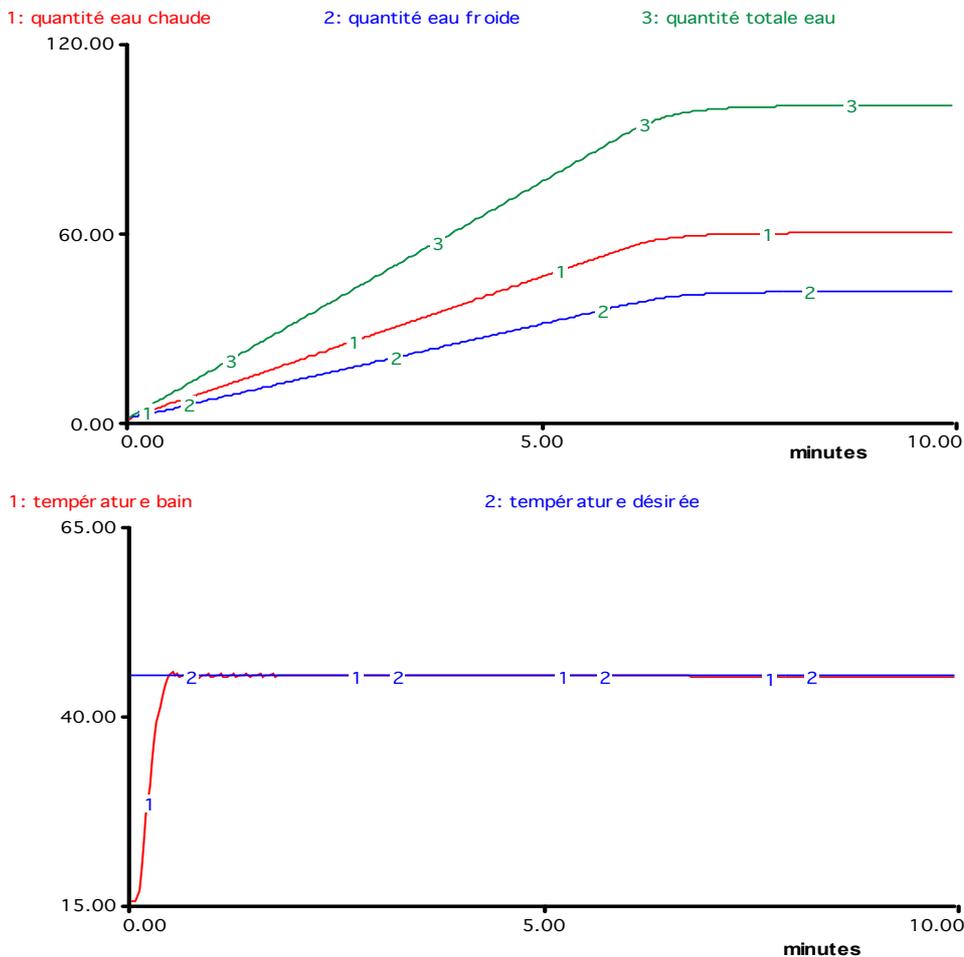
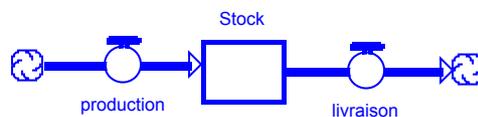


Fig. III.2.5

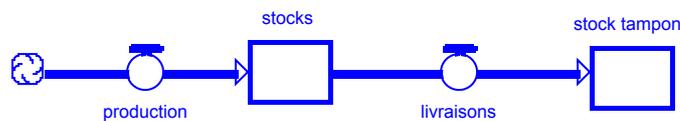
Essayons de traiter maintenant un problème plus complexe, par exemple l'analyse d'un marché de produits (matières premières, produits manufacturés, etc.). Nous avons fait un diagramme causal de principe, dont la dernière version se trouve Fig. III.2.2., et dans lequel nous avons mis en évidence, dans un premier temps, quatre variables d'accumulation :

Les STOCKS, le CARNET de COMMANDE, la CAPACITE de PRODUCTION et le PRIX

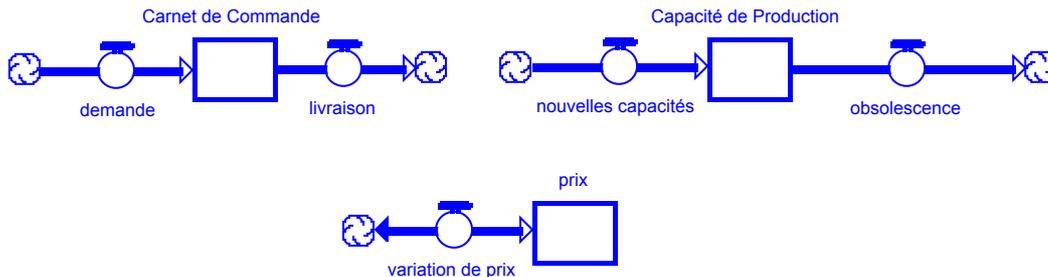
Commençons par les stocks, en nous posant la question : qu'est-ce qui remplit et qu'est-ce qui vide les stocks ? La réponse est évidente et peut être résumée par le petit schéma suivant (utilisant la symbolique des logiciels ithink et Stella) :



Ainsi que nous l'avons expliqué auparavant, les petits nuages à gauche et à droite du dessin symbolisent des sources et des puits infinis : on ne se soucie pas de savoir d'où viennent les éléments produits ni s'il y a assez de pièces détachées pour pouvoir produire, et on ne veut pas savoir non plus où vont les livraisons. Si, par contre, ces dernières devaient passer par un stock tampon, on aurait le schéma suivant :



Nous aurons les mêmes types de schémas pour les autres variables d'accumulation :



Parmi les trois schémas ci-dessus, seul celui du prix mérite qu'on s'y attarde un peu.

Il n'est pas obligatoire de considérer le prix d'un produit ou d'une matière première comme une variable d'accumulation. Mais cela peut être justifié (et utile) si ce prix a peu de chance de varier brutalement (tomber par exemple à zéro du jour au lendemain). Même si le produit n'est plus vendu ou temporairement plus disponible, son prix reste figé à la dernière valeur connue, ce qui caractérise la notion de variable d'accumulation.

Nous verrons toutefois, lors de l'exemple concernant le Marché Pétrolier, qu'il peut y avoir à certains moments, des inconvénients à considérer le prix comme une stricte variable d'accumulation, et qu'il faut rester souple dans la représentation de cette variable.

Pour faire évoluer le prix, on crée une variable appelée « variation de prix » qui pourra être positive – augmentation du prix - ou négative – baisse du prix -, ce que symbolise la double flèche du flux correspondant.

Il nous reste maintenant à répondre à la question suivante : quelles sont les variables qui influencent les flux que nous venons de mettre en évidence, à savoir : production, livraison, demande, nouvelles capacités, obsolescence (des moyens de production), variation de prix. En bref, quels sont les robinets qui régissent ces flux, et qu'est-ce qui fait qu'on ouvre ou qu'on ferme ces robinets ?

Nous n'allons pas, à ce stade, compléter le diagramme dynamique du problème considéré. Tout reste à faire, et c'est à partir de cette étape que le modèle croîtra d'autant plus et d'autant plus vite que l'on voudra introduire toutes sortes de scénarios différents, que l'on imaginera de nombreux futurs que l'on voudra simuler tout en les rendant de plus en plus complexes, réalistes ou improbables, mais toujours possibles.

La phase de décomposition en variables d'accumulation et de flux est à la fois simple et nécessaire du point de vue description des dynamiques de comportement, elle permet aussi de sérier les problèmes et de se donner des points de départ pour la modélisation. Mais ce n'est qu'un point de départ ; il reste à déterminer les logiques de fonctionnement du système considéré, la formalisation possible des relations, la quantification de ces relations.

Voyons par exemple ce qu'il faut faire pour représenter la fonction de production. Si l'on se réfère au schéma Fig.III.2.2, comment formalisera-t-on cette variable ?

La production dépend a priori :

du carnet de commande : c'est là une force qui pousse à produire (en première approximation, et toutes choses égales par ailleurs, la production sera proportionnelle au carnet de commande)

de la Capacité de Production. C'est là à la fois une contrainte et une force de poussée : contrainte car on ne peut pas produire plus que la Capacité de Production ne le permet, force car plus importants sont les moyens disponibles, plus on voudra produire pour valoriser ceux-ci.

du stock déjà existant, ou plutôt de l'écart entre ce stock et le stock que l'on désire avoir. Il s'agit d'une force de régulation, dont l'effet sera d'accélérer ou au contraire de réduire les effets des facteurs précédents (carnet de commande, surcroît de moyens de production).

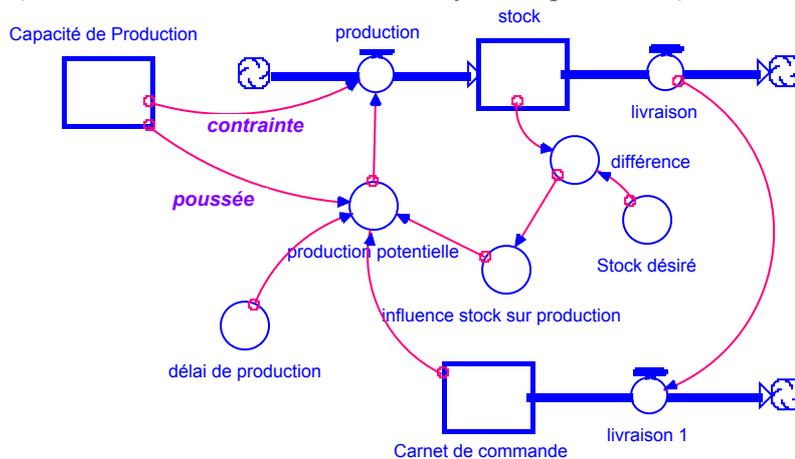


Fig. III.2.6

Explicitons quelque peu ce schéma.

La production dépendra de quatre variables ou paramètres :

- la Capacité de Production : son double rôle, à la fois de contrainte et de facteur de poussée, nous amène à séparer production potentielle, résultat des forces en présence, et production réelle, normalement égale à la production potentielle mais pouvant être contrainte par la Capacité de Production existante :

$$\text{production} = \text{MIN}(\text{production potentielle}, \text{Capacité de Production})$$

- le Carnet de Commande dont dépend directement la production potentielle, après un délai de production qui est un paramètre influençant la production (en fait le Carnet de Commande déclenche une mise en production, le produit fini arrive donc après un délai qui lui-même peut varier, et dépendre par exemple de la différence entre Capacité de Production et Carnet de Commande : plus la Demande est forte, plus le délai de production risque d'augmenter),

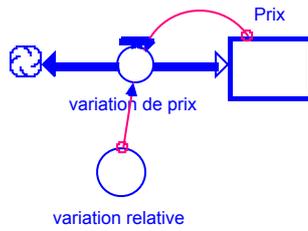
- l'écart entre stock désiré et stock réel. Plus cet écart est grand, plus on poussera à produire au-delà du Carnet de Commande ; au contraire si le stock paraît suffisant, on pourra ralentir la production. Cet effet d'accélération ou de ralentissement de la production n'est en général pas directement proportionnel à la cause, il doit être formalisé par une relation non-linéaire, en général une relation graphique entre différence (stock désiré - stock) et son effet sur la production.

Une remarque concernant le schéma ci-dessus : toute livraison diminue à la fois le stock et le Carnet de Commande. Toutefois, ce qui diminue le stock est de la matière (produit) alors que ce qui diminue le Carnet de Commande est du papier, c'est-à-dire de l'information. Cette différence correspond à ce qui est fait sur le schéma, où les flux de livraison sont différenciés (« livraison » et « livraison\_1 »), même si les valeurs sont les mêmes (« livraison\_1 » = « livraison »).

Fonction PRIX : comment modéliser et formaliser cette fonction ? De quoi dépend la variation de prix ?

(Remarquons avant tout que la représentation qui va suivre n'est ni obligatoire ni universelle. Elle résulte d'une certaine expérience de la modélisation, que d'autres expériences peuvent contredire. En particulier, nous verrons dans un exemple ultérieur qu'il peut être utile de considérer le prix comme une combinaison d'une variable d'accumulation et de variables d'influence directe).

Cette variation de prix est un flux qui s'exprime en unité monétaire (\$, Francs, Euros, ...) par unité de temps. Par contre, une variation de prix s'exprime le plus souvent en %, c'est-à-dire en variation relative. D'ailleurs, si on demande à un expert son avis sur telle ou telle cause de variation des prix, on s'exprimera de préférence en % : telle variation de la cause, en %, aura tel effet en % sur les prix.

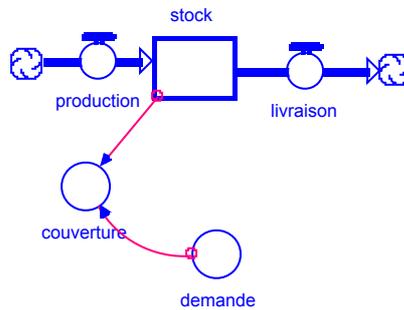


La relation entre variation relative et le flux de variation de prix est simple :  $DP_x = P_x \cdot (DP_x/P_x)$  ce qui est représenté sur le petit schéma ci-dessus.

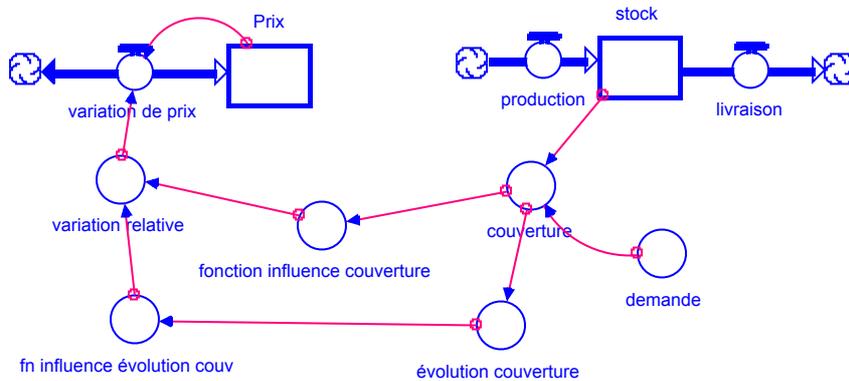
Quelles variables influencent la variation relative de prix ? La réponse diffère largement selon le produit, la situation, le lieu et l'époque. Proposons une modélisation, entre les nombreuses possibles :

Le prix dépendra d'abord de la couverture du produit, c'est-à-dire de sa disponibilité, exprimée en unité de temps (mois, semaines, jours, etc.) :

$$\text{Couverture} = \text{Stock}/\text{Demande}$$



Cette influence n'est pas linéaire, elle passe par une relation non-linéaire que nous représenterons, comme presque toujours en pareil cas, par une fonction graphique. Par ailleurs, en plus de sa valeur en tant que telle, la couverture agit à travers son évolution : pour une couverture donnée, si elle a tendance à augmenter, cela pourra accélérer la baisse des prix ou ralentir leur augmentation. Là aussi, cette influence se fera sentir à travers une relation non-linéaire (fonction graphique).



Enfin, le prix dépendra naturellement du prix de revient, d'où le schéma suivant qui correspond à une modélisation possible du prix :

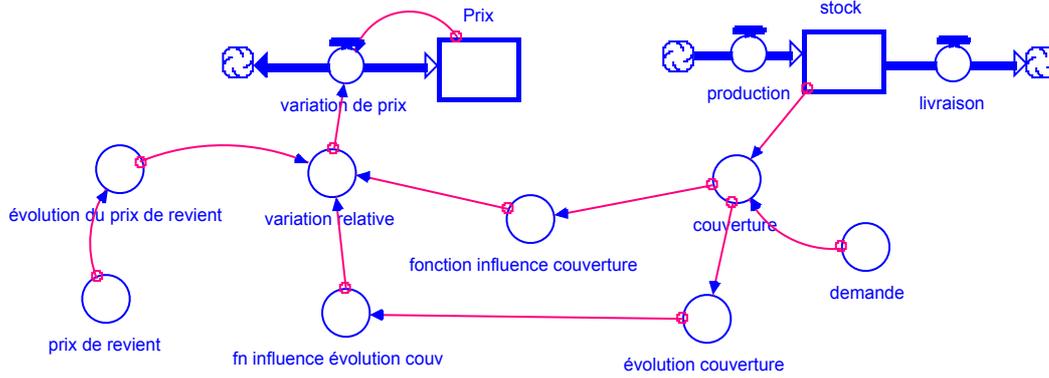


Fig. III. 2.7

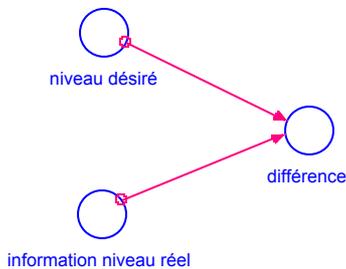
### III - 3 – Formalisation et Quantification

#### III – 3 – 1 – Formaliser les Relations

Dans tous les schémas qui précèdent, les flèches qui relient les variables entre elles symbolisent une relation de cause à effet, une relation qu'il faudra formaliser et quantifier.

Dans son principe, la formalisation d'une relation de cause à effet pourra être mathématique, et/ou logique, et/ou probabiliste. Elle pourra être simple (notre préférence), plus ou moins limitée aux quatre opérations de base, ou au contraire complexe, utilisant un enchevêtrement de fonctions mathématiques, sous-entendant alors une connaissance approfondie et détaillée des processus en question (ce qui est rare).

Voyons quelques exemples contrastés de formalisation, du plus simple à plus complexe :



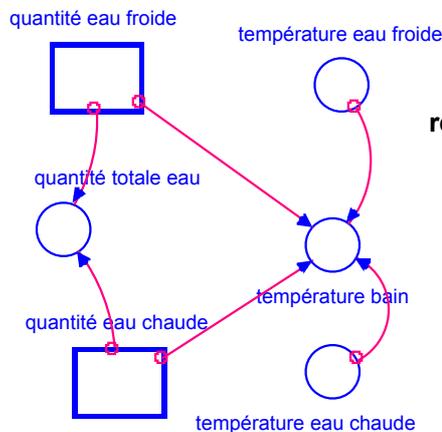
relation très simple :

$$\text{Différence} = \text{niveau désiré} - \text{information niveau réel}$$

Fig. III.3.1

relation très simple :

$$\text{quantité totale eau} = \text{quantité eau froide} + \text{quantité eau chaude}$$

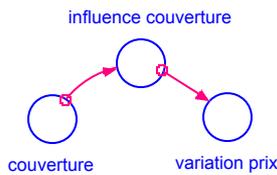


relation assez simple :

$$\text{température bain} = \frac{((\text{quantité\_eau\_froide} * \text{température\_eau\_froid e}) + (\text{quantité\_eau\_chaude} * \text{température\_eau\_chaude}))}{(\text{quantité\_eau\_froide} + \text{quantité\_eau\_chaude})}$$

(c'est à dire moyenne pondérée des températures compte tenu des quantités respectives d'eau froide et d'eau chaude)

relation assez compliquée, qui s'écrit en langage informatique :



**influence couverture = SMTH3(IF couverture>0 THEN  
-EXP(.03\*couverture) ELSE 1/EXP(.02\*couverture),2)**

La couverture influence les prix, après un retard moyen de 2 unités de temps, à travers une fonction exponentielle, fonction qui dépend elle-même du signe de la couverture.

Fig. III.3.2

Pour expliquer notre préférence pour les relations simples entre variables, il ne faut pas oublier que la complexité, telle que nous la concevons et essayons de la comprendre, de l'analyser et de la reproduire, provient avant tout du grand nombre de variables d'un système, du grand nombre de relations et surtout du grand nombre de boucles qui en résultent, et non de relations compliquées entre variables.

De plus, il faut garder à l'esprit que la formalisation proposée sera effective tout le temps de la simulation, à moins de spécifier explicitement le contraire (par exemple : relation valable de tel instant  $t_1$  à l'instant  $t_2$ , pas valable en dehors de cette plage de temps), ce qui milite en faveur de relations simples facilement modifiables.

Lorsqu'il semble nécessaire d'introduire une relation complexe entre deux variables, la représentation à l'aide de fonctions mathématiques ne peut être en général qu'une approximation. Nous préférons dans ce cas une représentation graphique, le plus souvent non-linéaire.

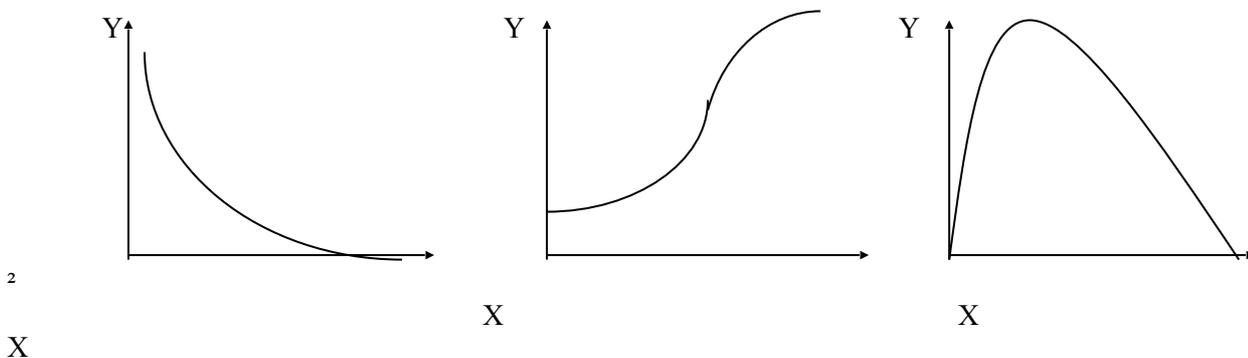
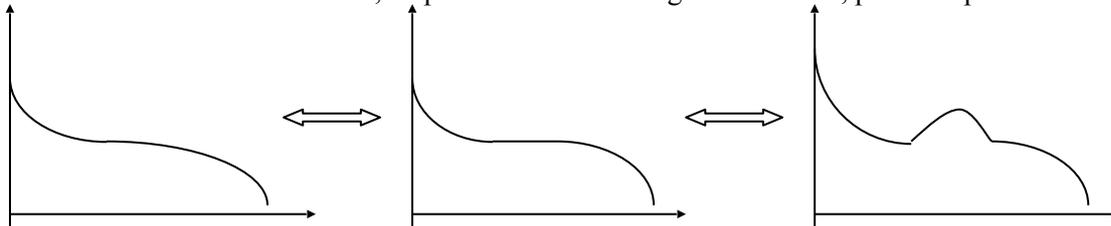


Fig. III.3.3

Une telle représentation graphique, qui constitue elle-même une approximation de la ou des relations réelles qui peuvent lier entre elles deux variables, présente des avantages :

- elle est plus intuitive qu'une représentation mathématique complexe, ce qui est particulièrement utile lorsqu'il s'agit de demander à un expert du sujet (rarement féru de relations mathématiques) d'évaluer et d'exprimer la relation entre deux variables,

- elle est facilement modifiable, en particulier sur des segments limités, par exemple :



- une représentation graphique rappelle mieux qu'une équation mathématique formelle et figée, le fait qu'il ne s'agit, le plus souvent, que d'une approximation de la réalité.

### III – 3 – 2 – Quantification (Conditions Initiales et Paramétrage)

Cette phase vient en parallèle, parfois même avant l'étape de formalisation.

Il s'agit d'une part de figer le point de départ du modèle, comme on fige le point de départ d'une fusée dont le programme de vol (le contenu de notre modèle) est écrit par ailleurs.

Lorsqu'il s'agit de baignoire, est-elle vide ou déjà à moitié pleine au départ de la simulation ?

Dans le cas d'un modèle de population, de quelle population s'agit-il ? De la population française, mondiale, d'animaux, de poissons dans la mer ou dans un aquarium ?

S'agissant d'un stock ou d'un prix, quelles sont les valeurs de ces variables au départ de la simulation ?

Ce point de départ est déterminé par l'ensemble des valeurs initiales des variables intégrales (accumulation) du modèle, c'est donc ces valeurs initiales qu'il faut commencer par renseigner.

Remarque : d'une manière générale, ces valeurs initiales seront des données numériques. Il peut arriver, toutefois, que la valeur initiale d'une variable d'accumulation soit fonction d'une autre variable ou de plusieurs autres variables du modèle, et les logiciels spécialisés de Dynamique des Systèmes permettent la représentation correspondante (par exemple :  $INIT(X) = INIT(Y) + INIT(Z)$ ). Nous suggérons toutefois de ne pas abuser de cette facilité, car on risque d'aboutir rapidement à une boucle instantanée, c'est-à-dire à un ensemble d'équations simultanées, du type :

$$INIT(X) = INIT(Y) + INIT(Z)$$

$$INIT(Y) = f_1(INIT(Z))$$

$$INIT(Z) = f_2(INIT(X))$$

que l'on ne saura pas résoudre et qui seront refusées par le simulateur.

D'autre part, tout modèle comprend un certain nombre de constantes de paramétrage auxquelles il faut donner une valeur a priori, à peu près cohérente et crédible, quitte à modifier ces valeurs lors des processus de calibrage et de validation du modèle. Ainsi, dans les exemples précédents, on aura entre autres, comme paramètres constants :

Niveau désiré (d'eau dans la baignoire) : 50 cm

Durée du bain : 15 minutes

Température eau chaude : 65°C

Température eau froide : 18°C

Température désirée : 40°C

Stock désiré : 50 (par exemple voitures)

Délai de production : 20 jours

### III - 4 - La Simulation

Il reste alors la phase de simulation, celle qui permet de :

1 - tester le modèle, en introduisant enfin explicitement la variable temps (ce qui, dans les logiciels dédiés à notre démarche, est fait automatiquement. Le temps est même la seule variable sur laquelle on n'a aucune prise. En particulier, il n'est pas question de faire machine arrière, de reculer dans le temps !).

Notons qu'il n'est pas nécessaire de compléter tout un modèle avant d'en simuler le comportement au moins partiel. Au contraire, on peut considérer l'outil de simulation comme une aide à la formulation des relations du modèle, permettant de tester très rapidement la validité de telle ou telle formulation, et ce dès le début de la phase de modélisation. Compte tenu de la complexité dynamique des systèmes étudiés, la validation des équations et des relations à l'aide du simulateur sera souvent beaucoup plus facile et rapide (quelques secondes) qu'une vérification théorique et abstraite des formulations mathématiques proposées, vérification à laquelle nous ne sommes pas toujours bien habitués. La boucle **MODELISATION**  $\leftrightarrow$  **SIMULATION** prend son sens et son utilité, et doit être appliquée dès que possible.

2 - analyser les dynamiques possibles, mettre parfois en évidence des comportements imprévus, parfois même contre-intuitifs.

3 - réaliser et étudier des scénarios qui seront toujours moins coûteux que des essais réels (souvent impossibles d'ailleurs à mettre en oeuvre, en particulier dans le domaine des sciences sociales ou lorsque les constantes de temps et l'horizon de simulation sont grands).

4 - faire de la prospective (souvent le but implicite de toute étude).

5 - modifier le modèle mental et l'expertise des décideurs et des spécialistes.

6 - s'attaquer éventuellement à la phase ultime, à savoir les modifications de structure destinées à générer les comportements désirés (modification de la réalité).

Parmi les buts énumérés, certains sont évidents et nous ne nous y attarderons pas. Par contre, nous donnerons dans la deuxième partie, des exemples de modèles effectivement réalisés, utilisés et parfois publiés pour montrer des résultats concrets de notre démarche et par-là démontrer l'utilité, au-delà de la modélisation, de la phase de simulation, c'est-à-dire de l'utilisation extensive des modèles.

En ce qui concerne la mise à jour et la modification éventuelle du modèle mental des experts ayant participé à la mise au point du simulateur, notons que des simulations en grand nombre, montrant divers avènements possibles, parfois catastrophiques, parfois irréalistes, en réponse à des scénarios très variés, peuvent amener ces experts à modifier partiellement leur analyse. La simulation (le vécu en raccourci de scénarios difficilement réalisables en temps réel) contribue en quelque sorte à faire évoluer l'expertise, accroissant ainsi la fiabilité et la durée de vie des modèles correspondants. Ce processus d'évolution - qui se répète souvent de manière itérative - constitue un apport fondamental de la Dynamique des Systèmes au "savoir" des experts dans les domaines évolutifs des sciences sociales, en économie et en finances en particulier, c'est-à-dire dans des domaines où l'avenir n'est jamais semblable au présent, jamais vraiment répétitif.

### III - 5 – Calibrage et Validation

Le calibrage constitue dans une certaine mesure, la phase la moins valorisante et la plus rébarbative du travail de conception, réalisation et exploitation d'un modèle. C'est la phase « fourmi » au cours de laquelle le modèle est peu à peu ajusté, les erreurs - de moins en moins fréquentes mais de plus en plus « tordues » - sont éliminées, les données sont modifiées et calées à mesure de l'ajustement du modèle à une réalité constatée ou supposée. C'est la phase « 90 - 10 » au cours de laquelle les derniers 10% du modèle nécessitent 90% du temps, mais c'est aussi une phase indispensable qui permet de comprendre de mieux en mieux le fonctionnement de l'outil, d'en constater certains comportements étonnants, aberrants, bref de « s'approprier » le système.

Nous avons volontairement séparé les concepts de calibrage et de validation, alors que les phases correspondantes de travail sont souvent difficilement dissociables et se recouvrent au moins partiellement.

Le calibrage est une étape pendant laquelle le spécialiste de modélisation travaille le plus souvent seul face à son modèle dont il doit déceler les erreurs d'écriture, de conception, de cohérence. On testera non seulement la cohérence du modèle dans les cas usuels de fonctionnement, mais aussi son comportement en situations extrêmes qui peuvent faire apparaître des erreurs cachées de modélisation.

La Validation, au contraire nécessite la présence et la participation active des experts du système étudié. C'est au cours de cette phase, et grâce à la présence active de tels experts, que le modèle pourra acquérir ses « lettres de noblesse », et être accepté tant pour sa validité à représenter le passé ou les intuitions des experts, que pour sa capacité à simuler de façon convaincante des scénarios nombreux et variés. Il est net que c'est la réaction de ces experts qui décidera de la vie à venir du modèle en question, ou au contraire de sa disparition dans les oubliettes des outils inutilisés.

Calibrage et validation – dont nous avons dit combien ces phases étaient parfois difficilement différenciables – peuvent se faire de plusieurs façons :

1 - vérification expérimentale, in situ, quantitative ou qualitative, valable surtout pour les systèmes physiques. Mais notons que plus le système est complexe dans ses modes de comportement, dans sa structure aussi, moins l'expérimentation est aisée. Un système complexe comporte, en effet, de nombreuses variables d'entrée qui peuvent être à un moment ou à un autre influencées par le comportement, l'évolution du système (il s'agit là d'un feedback classique où le système rétroagit sur les entrées). D'où la difficulté de concevoir une expérimentation qui tienne compte de ces rétroactions dont l'effet peut être très important. Remplacer, en vue d'une mesure, une structure complexe par une boîte noire, revient parfois à créer cette simplification trompeuse et réductrice que nous citions en introduction.

2 - confrontation avec les statistiques existantes et réglage du modèle pour tenter de minimiser les différences entre résultats de simulation et séries historiques. Certains logiciels (Powersim par exemple) comportent des outils d'optimisation correspondants. Naturellement, de telles statistiques n'existent la plupart du temps que dans les domaines de l'économie, parfois du marché de produits ou de systèmes de

production déjà anciens. Dans de nombreux domaines où les problèmes de comportement dynamique sont complexes et où la démarche Dynamique des Systèmes peut être utile, de telles statistiques historiques n'existent pas, soit qu'il s'agisse d'un domaine nouveau (développement de produits nouveaux, innovation, prospective, etc.), soit qu'on ne puisse faire des mesures quantitatives précises (psychologie comportementale, certains domaines de la médecine, analyses politiques), soit enfin que tout simplement... on ne sache où trouver des statistiques, si elles existent (nombreux domaines de productique, de stratégie d'entreprise, etc.).

3 - Avis d'expert. L'absence de statistiques ne signifie pas absence de connaissance ni d'expertise. L'expérience du modélisateur, des experts qui l'entourent, permet de pallier l'absence de « données ». On peut remplacer l'historique – qui ne décrit qu'une seule des réalités possibles du passé – par l'expérience, la logique, l'esprit de cohérence des personnes participant à l'élaboration, à l'analyse critique et à l'utilisation d'un modèle. Ces caractéristiques – expérience, logique, cohérence – permettent entre autres, de proposer des scénarios extrêmes et d'analyser des résultats qui ne peuvent correspondre à aucune situation historique. S'il est vrai que l'absence de données précises peut rendre un modèle moins « exact », la prise en compte d'une expérience accumulée mais non écrite de diverses personnes permet d'en élargir le domaine de validité prospective (de même que les données orales sont bien plus nombreuses mais moins précises que les données écrites ou chiffrées – voir cône du § II-9 -, de même la connaissance et l'esprit d'analyse des personnes participant à la modélisation, permet d'envisager et d'analyser de façon critique de très nombreux scénarios ne correspondant ni ne résultant d'aucun comportement historique passé).

Notons que les experts eux-mêmes peuvent demander des essais de simulation aux extrêmes, essais qui dans la réalité physique pourraient s'avérer destructifs donc irréalisables, et qui permettent d'élargir (quasi gratuitement, le coût d'une simulation) leur propre champ d'expertise.

Les avis d'experts sont donc essentiels pour déterminer les "fonctions de transfert" entre variables, ces relations qui rendent compte du fonctionnement, du mode opératoire d'un objet complexe.

4 - Simulation partielle ou totale du modèle. Mais dès lors que la structure se complique, que le temps intervient pour générer des comportements complexes et souvent inattendus, ni l'expérimentation n'est aisée, ni les experts ne sont à leur aise pour analyser à priori ce qui va ou qui risque de se passer. Dans ces cas de dynamiques complexes, seule la simulation permet à la fois de guider l'expert dans son analyse, et de proposer des expérimentations nouvelles qui mettent en évidence ces dynamiques et permettent d'en tenir compte pour l'analyse et l'amélioration du système considéré. Rappelons ce qui a été dit plus haut, à savoir que plus un système modélisé est complexe, moins la validation de ses comportements devient aisée, et plus il faut commencer tôt à en simuler des parties qui pourront être progressivement raccordées les unes aux autres, à mesure de l'avancée du processus de validation partielle (certains logiciels – itthink, Stella, Powersim – entre autres – facilitent cette structuration en secteurs partiels que l'on peut tester isolément et successivement).

Pour terminer, rappelons qu'un modèle n'est jamais qu'une image d'une réalité mouvante, évolutive, et que cette image, pour rester représentative de la réalité, doit elle-même évoluer. Un modèle ne peut jamais rester figé, sous peine de devenir très vite obsolète, donc inutile et même potentiellement dangereux car pouvant induire en erreur par des résultats erronés. Dans les domaines de l'économie, de la stratégie, du management, un modèle – comme le modèle mental dont il découle - doit être constamment maintenu à jour à mesure de l'évolution de la réalité, du passage du temps. Quant aux domaines qui peuvent paraître plus figés, comme la médecine, la biologie, la psychosociologie, ne pas prendre en compte l'évolution des connaissances, ne pas introduire les changements correspondants dans la constitution et l'écriture des modèles correspondants, mènera rapidement à l'obsolescence et, malheureusement, à des résultats faux, donc potentiellement dangereux.

### III – 6 – Conclusion

Là se termine la présentation générale de la démarche appelée « Dynamique des Systèmes Complexes » ou tout simplement « Dynamique des Systèmes ». Nous avons essayé de présenter les principes de base de cette démarche, ainsi que les principales étapes par lesquelles il faut passer pour construire un outil de simulation fiable et potentiellement pérenne. Avant de passer à quelques applications réelles et complexes, rappelons le pourquoi de la Dynamique des Systèmes, quelques raisons d'être que l'on rapprochera utilement des principes et des mots clefs présentés précédemment (cf. en particulier le § II.9).

A qui s'adresse cette démarche, que nous appelons aussi « Systémique de l'Ingénieur » ? Répondre à cette question revient en grande partie à définir et préciser les principes de la Dynamique des Systèmes.

Cette démarche s'adresse :

- 1 – Tout d'abord à toutes les personnes qui veulent mettre en pratique leurs concepts « systémiques »,
- 2 – A toutes celles qu'intéresse le changement, qu'intrigue l'évolution des structures et des événements environnants, qui désirent comprendre le pourquoi et le comment du mouvement.
- 3 – Donc à quiconque veut analyser et comprendre le comportement dynamique de structures complexes, quelle que soit leur nature (on sait que cette démarche est depuis très longtemps employée, sous d'autres noms ou sous un nom presque semblable, par les scientifiques, les ingénieurs, pour analyser, simuler, améliorer le fonctionnement de systèmes physiques et technologiques : physique nucléaire, aéronautique, construction de centrales, d'usines, de plates-formes pétrolières, etc. C'est avant tout son extension aux systèmes qualitatifs, dits "flous", qui nous intéresse).
- 4 – Aux personnes qui désirent mettre en évidence les facteurs structurels agissants d'un système, au-delà d'explications purement conjoncturelles des phénomènes.
- 5 – A celles et à ceux qui sont conscients de l'importance – souvent mal perçue – des structures bouclées dans les comportements complexes et difficilement analysables de très nombreux systèmes. Ces structures bouclées, la plupart du temps complexes (délais, non-linéarités), souvent même compliquées (interconnexions multiples), sont à l'origine de la difficulté qu'à l'être humain à en prévoir et en analyser de manière intuitive le comportement dynamique. Des techniques existent pourtant, qui permettent une analyse rationnelle de ces structures bouclées, qui parfois même rendent possibles la mise au point de modifications structurelles destinées à améliorer les comportements correspondants.
- 6 - A quiconque, enfin, qui ayant à cœur de développer sa compréhension des phénomènes par une analyse quantitative des « forces » et des dynamiques correspondantes, ira jusqu'au bout de la démarche, et fera l'effort nécessaire à la modélisation formalisée et quantifiée, et à la simulation des systèmes étudiés.
- 7 - Et naturellement, à celles et à ceux qui, voulant faire de la prospective intelligente et ne se contentant pas d'extrapoler les tendances actuelles, veulent profiter d'une démarche et d'outils nouveaux pour analyser toutes les situations, toutes les évolutions possibles, même les plus improbables, les moins crédibles a priori, celles que l'on n'ose à peine imaginer.

A condition de ne pas perdre "le point de vue de Sirius", de ne pas accepter non plus un rôle souvent néfaste et toujours dangereux de Pythie des temps modernes, l'utilisateur de la Dynamique des Systèmes Complexes peut être assuré d'avoir effectivement à sa disposition à la fois une démarche systémique et un outil opérationnel.

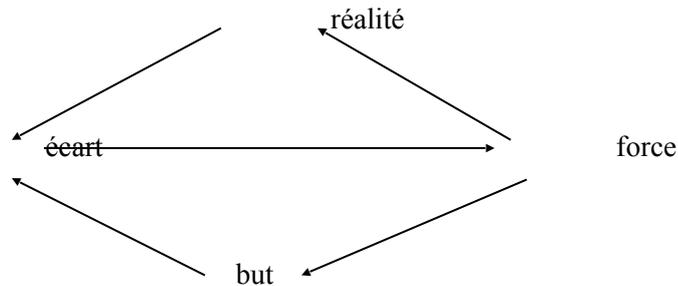
### **III – 7 – Rappel de deux concepts utiles**

Avant de fermer ce chapitre, il nous paraît intéressant de rappeler deux notions qui sont très souvent utiles lors de la conception puis de la réalisation de modèles en Dynamique des Systèmes.

### III – 7 – 1 – Ecart entre But et Réalité

Cette notion a été déjà brièvement évoquée au début de ce chapitre. D'une manière générale, pour tout système, pour toute variable que l'on cherche à asservir à un but, à un objectif, il faudra introduire la notion d'écart entre un tel but et la variable elle-même. Les spécialistes de la théorie du contrôle appellent cet écart un signal d'erreur par rapport à la consigne (le but), signal que l'on tend, bien évidemment, à annuler.

En engineering, le but est en général fixe (mais pas toujours, par exemple lorsqu'un missile cherche à atteindre un objectif mobile qui cherche à l'esquiver). Dans les systèmes qui nous concernent, tels l'économie, le management, les relations humaines, les objectifs sont presque toujours évolutifs – c'est même là une caractéristique importante de l'être humain -. On retrouve alors la double boucle

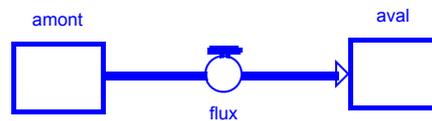


représentant d'une part l'évolution de la « réalité » en fonction de l'objectif fixé, d'autre part l'évolution de l'objectif à mesure que celui-ci semble atteint.

Lors de la conception, puis de la réalisation d'un modèle, il sera bon de se souvenir et d'appliquer cette notion de « signal d'erreur ». Pour le modélisateur, cela reviendra à rechercher et à trouver les variables buts correspondant aux variables classiques représentant une réalité évolutive.

### III – 7 – 2 – Conservation des variables d'Etat (accumulation)

Bien qu'il ne faille pas généraliser, il est bon de se souvenir que souvent, on ne peut « remplir une baignoire » qu'en en « vidant » une autre, ce qui se représente simplement :



Deux exemples de ce principe de conservation de population seront développés dans les chapitres concernant le marketing et la gestion de grands projets. L'intérêt de ce principe de conservation réside dans le fait qu'il devient quasiment impossible, lorsqu'on l'applique, de générer des variables dont l'évolution aille au-delà du possible ou du concevable.

Donnons deux exemples qui seront développés en détail dans les chapitres d'application.

#### III – 7 – 2 – 1 – Evolution d'un projet

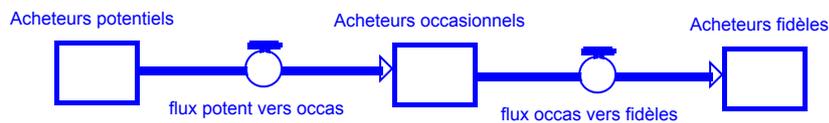
Lors de la réalisation d'un projet quelconque, nous considérons qu'il y a transformation des tâches, de l'état de « tâches à faire » à celui de « tâches terminées » (bien terminées ou mal réalisées, nous verrons cette distinction plus loin).



Cette représentation empêchera automatiquement de générer au fil du temps une quantité de tâches terminées supérieure au nombre de tâches à faire (compte non tenu des tâches mal faites, à refaire ultérieurement).

### III – 7 – 2 – 2 – Génération d'une clientèle (Marketing)

Il est bon de considérer que la génération de clients fidèles, d'acheteurs réguliers d'un produit quel qu'il soit, ne provient pas d'une source infinie, mais plutôt d'une quantité finie de « non-acheteurs », ou encore d'« acheteurs potentiels », ou si l'on veut décomposer le type de clientèle, d'« acheteurs occasionnels » eux mêmes issus du puits d'« acheteurs potentiels ».



On évite ainsi le risque de générer progressivement un nombre infini de clients, bien supérieur au nombre total...d'être humains, par exemple. L'augmentation du nombre de clients fidèles sera automatiquement limitée et contrebalancée par le tarissement correspondant de la source de non-acheteurs (acheteurs potentiels).

## IV – Quelques exemples d'application de la Dynamique des Systèmes

Les exemples qui vont suivre sont destinés à montrer

- l'intérêt de la démarche pour comprendre, anticiper, mieux connaître et mieux décider ;
- l'applicabilité pratique de la DS et des outils qui existent dans ce domaine.

Nous nous efforcerons de guider le lecteur tout au long de ces cas pratiques, en montrant le pourquoi de certains chemins et de certaines progressions dans le processus de modélisation/simulation, en développant et en explicitant certaines astuces qui pourraient s'avérer utiles, mais que chacun adaptera en fonction de ses besoins et de son approche à l'analyse dynamique des systèmes complexes. Notre façon de modéliser n'en est qu'une parmi d'autres, et nous savons que tout problème, tout système peut être modélisé de plusieurs façons différentes par divers modélisateurs. Seul le résultat compte, c'est-à-dire d'une part les simulations (le comportement d'un même système, avec les mêmes paramètres, les mêmes conditions initiales et les mêmes fonctions de calcul, doit être identique quel que soit le modèle qui le représente), d'autre part le bénéfice qu'en tirent les utilisateurs, les experts et les modélisateurs.

Nous n'avons donc aucune prétention à présenter le « meilleur » modèle, ou le plus simple, du problème posé. Mais les modèles présentés ont chacun permis de progresser dans la connaissance pratique du système correspondant ; nous espérons aussi, par la présentation que nous en ferons, accroître l'expérience du lecteur intéressé.

Nous allons montrer plusieurs applications, très différentes les unes des autres, et qui n'ont de point commun entre elles que la complexité de comportement dans le temps, complexité due essentiellement à la présence de boucles non-linéaires au sein de chacun des systèmes.

A travers ces applications, nous montrerons :

- L'obtention surprenante de résultats imprévus dans un domaine de pollution de l'environnement (de la Possibilité d'Apparition de Catastrophes Différées),
- Un début d'application de la boucle IDAR (Information – Décision – Action – Résultat) dans le domaine de l'exploration pétrolière,
- La réalisation de modèles et leur utilisation pour la détermination et l'exploitation de scénarios dans le domaine de la Gestion de Grands Projets,
- L'approche prospective à travers une analyse d'un marché de matière première, en l'occurrence le pétrole. A cette occasion, nous présenterons une modélisation possible du processus d'investissement et de développement en moyens de production.
- Enfin, l'aide à une meilleure compréhension d'un fonctionnement dynamique complexe dans un domaine essentiellement qualitatif et flou : les Dynamiques de Comportements Motivationnels, modèle MODERE.

## **V - Une Application dans le domaine de l'Environnement**

### **De la Possibilité d'Apparition de Catastrophes Différées**

Cet exemple (22) est destiné à montrer l'utilité de la simulation quantitative, au-delà de la seule analyse qualitative, pour mettre en évidence certains comportements surprenants, inattendus, pouvant être à l'origine de très graves conséquences.

Parti, en effet, d'un simple exercice suggéré par des scientifiques du CNRS, pour vérifier l'applicabilité de la démarche à une analyse d'évolution de population en cas d'accident (pollution), ce petit modèle, simple et didactique, fait apparaître des résultats inattendus qui rendent soudain très palpable l'intérêt de la démarche. La curiosité pour les résultats surprenants se double d'un intérêt scientifique, un théorème ayant été démontré (23) à partir des résultats de ce modèle.

En résumé, lors de la mise au point d'un modèle de simulation de la contamination d'un écosystème simple, nous avons mis en évidence un phénomène intéressant de "catastrophe différée". Une augmentation très faible d'un influx de pollution déstabilisant momentanément le système (retour lent à l'équilibre à travers des oscillations amorties) s'avère fatale : les premières oscillations ont bien lieu comme prévu, mais au lieu du retour à la normale, on assiste, après un délai plus ou moins long, à une disparition soudaine et définitive des populations sensibles.

Ce phénomène n'apparaît que dans une plage étroite de variation des paramètres du système, et peut donc passer facilement inaperçu en l'absence d'une politique systématique de simulation à l'aide de multiples scénarios. Et pourtant, il pourrait expliquer dans certains cas l'apparition de catastrophes apparemment incompréhensibles.

Une analyse plus systématique des multiples scénarios possibles, ainsi qu'une généralisation du modèle à plusieurs populations dans un même milieu aquatique, montre la possibilité d'avoir des résultats très diversifiés mais répétables et crédibles.

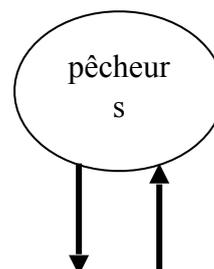
Le modèle - simple dans un premier stade - décrit la pollution d'un milieu aquatique par un polluant, dans notre cas du cadmium (ce pourrait être n'importe quel polluant et n'importe quel milieu ambiant pollué). Dans ce milieu aquatique se développent et meurent différentes espèces animales et végétales : algues, daphnies, poissons, etc. Les taux d'accroissement ou de disparition de chacune de ces populations sont directement ou indirectement liés aux autres populations ainsi qu'à la concentration de polluant.

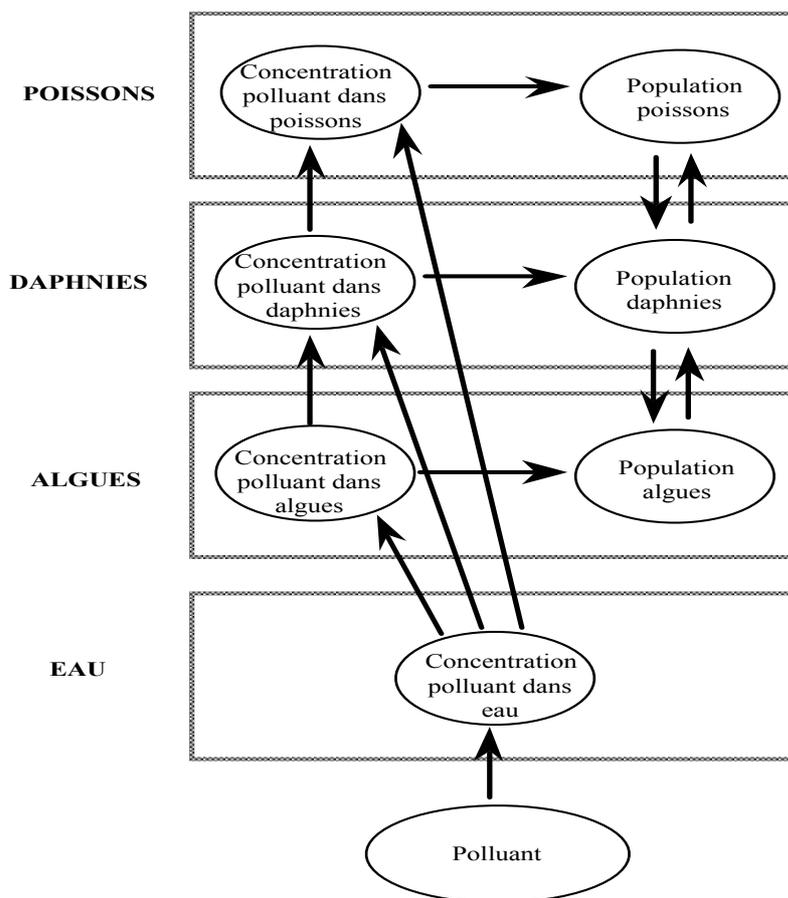
Le modèle original comporte donc 7 secteurs (cf. fig. V.1) fortement interconnectés entre eux. Pour compliquer un peu le problème, nous avons ajouté, plus tard, un 8<sup>ème</sup> secteur, représentant les pêcheurs.

*(Nous suggérons de décomposer autant que possible tout modèle en secteurs distincts, qui seront naturellement interconnectés entre eux. D'une part cela oblige à une certaine rationalité dans la conception du modèle, et facilite la présentation, d'autre part, avec certains logiciels, on peut tester les secteurs individuellement, ce qui très utile lorsqu'il s'agit de grands modèles).*

Les secteurs du modèle « Catastrophes différées » décrivent respectivement :

- les concentrations du polluant (bio accumulation le long de la chaîne trophique) dans l'eau, les algues, les daphnies, les poissons.
- les évolutions de populations : algues, daphnies, poissons, pêche





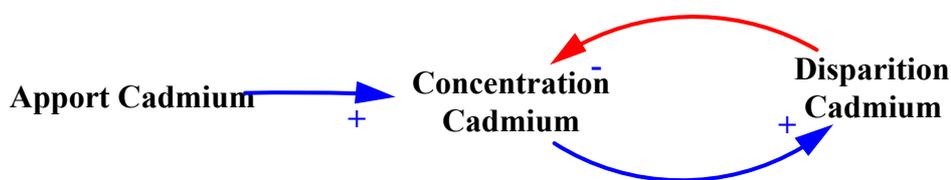
**Fig. V.1 : Structure générale**

Notons que cette décomposition en 7 ou 8 secteurs n'a pas été réalisée tout de suite. Dans un premier temps, nous ne pensions qu'à décrire l'effet du polluant sur les trois populations, donc trois secteurs que nous commencerons par décrire. Ce n'est qu'un peu plus tard, au vu sans doute des premières simulations, que nous nous sommes rendu compte que chaque population avait en fait une dynamique propre, liée à la pollution mais aussi aux dynamiques des autres populations. D'où les secteurs (7 ou 8 selon que l'on introduit ou pas les pêcheurs, dont la dynamique dépend de la population de poissons), tous interconnectés entre eux.

Examinons ces secteurs les uns après les autres.

### V – 1 – Concentration du polluant dans l'eau

La variable clef qui rend compte du niveau de pollution, est la concentration de polluant dans l'eau ainsi que dans les organismes vivant dans ce milieu aquatique.



**Fig. V.1.1**

On peut d'ailleurs tout de suite se rendre compte que cette concentration sera une variable d'accumulation (si apport et disparition s'arrêtent soudain, la concentration de cadmium restera figée), variable qui croîtra en

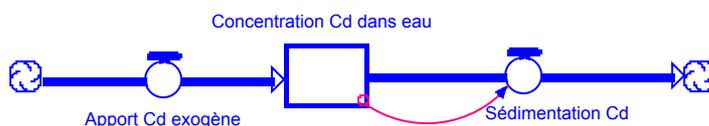


Fig. V.1.2

fonction d'un apport extérieur de polluant, et décroîtra par effet de « sédimentation » du cadmium, selon un taux de sédimentation qui dépendra du milieu ambiant et du polluant. Dans le cas présent, nous considérerons que ce taux est constant.

Le schéma complet de la concentration de cadmium dans l'eau sera le suivant :

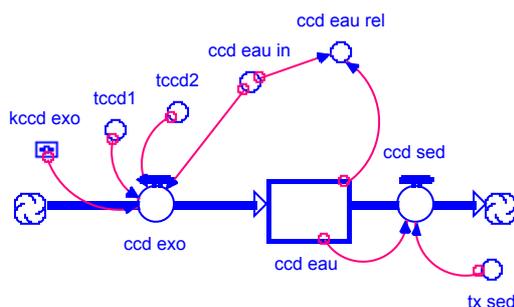


Fig. V.1.3

où ccd est utilisé comme abréviation de « Concentration de Cadmium ».

Voyons brièvement la signification des variables et des relations de la figure ci-dessus, qui n'existaient pas encore dans la Fig. V.1.2.

Il y a d'une part le Taux de Sédimentation (tx sed) qui intervient explicitement dans le flux de sédimentation

$$ccd\_sed = ccd\_eau * tx\_sed$$

{flux de sédimentation du cadmium contenu dans l'eau : ce flux est proportionnel à chaque instant au niveau de cadmium qu'il y a encore dans l'eau}

Le flux entrant de cadmium est une variable exogène qui peut prendre des formes diverses. Nous avons choisi de simuler un apport soudain et bref de polluant, sous forme d'une fonction « pulse », c'est-à-dire une impulsion de valeur « kccd exo » (ce sera un des paramètres principaux d'action), arrivant au temps tccd1 et se répétant tous les tccd2 (en rendant tccd2 très grand, on simule un cas de pollution unique, non répétée). Cette impulsion s'applique au niveau initial de pollution, que l'on peut faire varier, mais que l'on fixera à 1 dans tout ce qui suit.

Enfin, nous travaillerons en relatif, c'est-à-dire en variation de pollution, de concentrations, de populations. Une telle approche en variables relatives permet de rendre le modèle à peu près indépendant des valeurs initiales. La variable ccd eau rel est alors définie par :

$$ccd\_eau\_rel = ccd\_eau / ccd\_eau\_in$$

{évolution relative de la concentration de cadmium dans l'eau, par rapport à sa valeur initiale}.

## V – 2 – Concentration de cadmium dans les algues

En cliquant sur le pavé « concentration de cadmium dans les algues »,

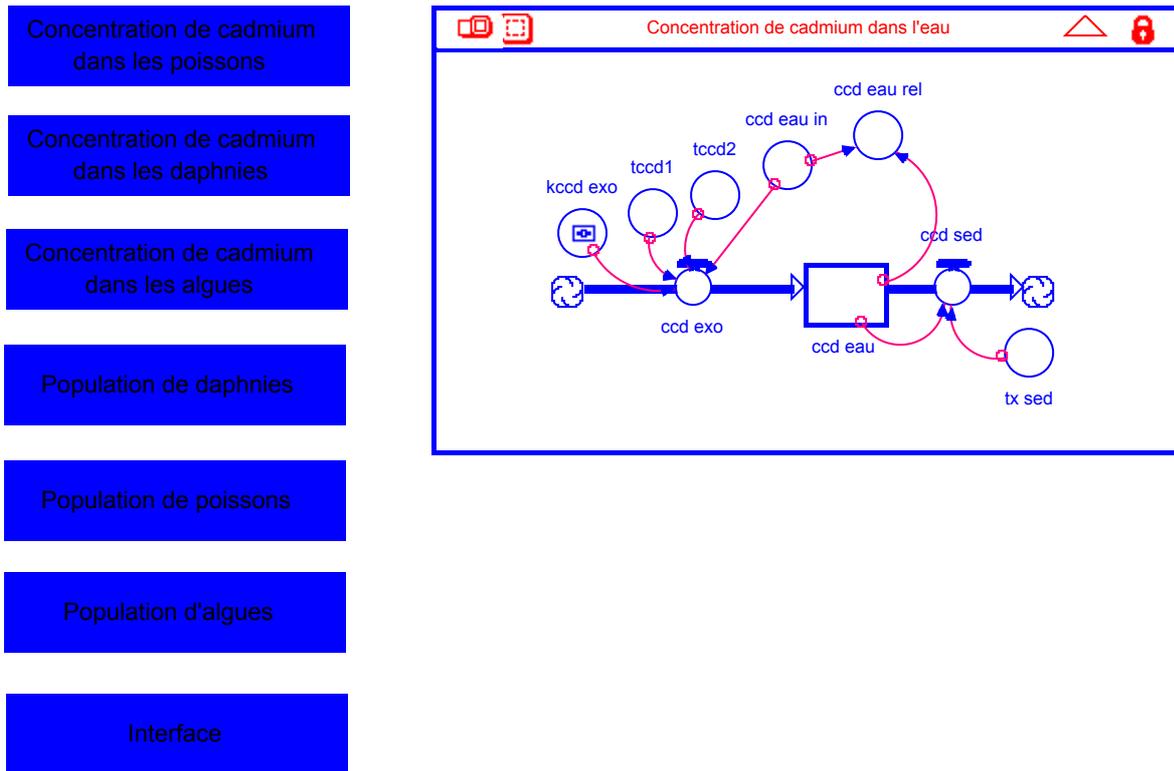


Fig. V.2.1

nous passons au schéma suivant, représentant la concentration de cadmium dans les algues, résultant de la pollution de l'eau absorbée par celles-ci.

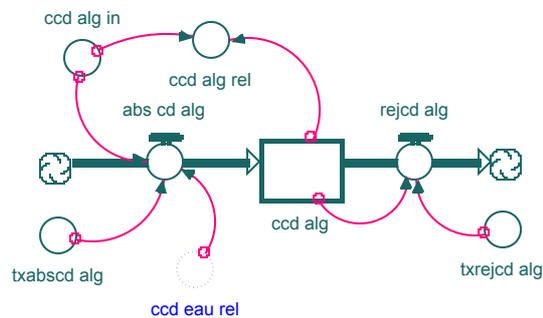


Fig. V.2.2

Dans son principe, ce schéma est très semblable à celui de la concentration de cadmium dans l'eau (Fig.5.1.3), à cela près que l'absorption de polluant par les algues est proportionnelle à la concentration de polluant dans l'eau absorbée par les algues.

$$\text{abs\_cd\_alg} = \text{txabscd\_alg} * \text{ccd\_eau\_rel} * \text{ccd\_alg\_in}$$

{absorption de cadmium par les algues = (taux d'absorption du cadmium par les algues) x (concentration relative de cadmium dans l'eau) x (concentration initiale de cadmium dans les algues)}  
(ce dernier terme est destiné à passer des valeurs relatives aux valeurs absolues de concentration)

### V - 3 - Concentration de cadmium dans les daphnies

En cliquant sur le pavé « concentration de cadmium dans les daphnies », on passe au schéma suivant :

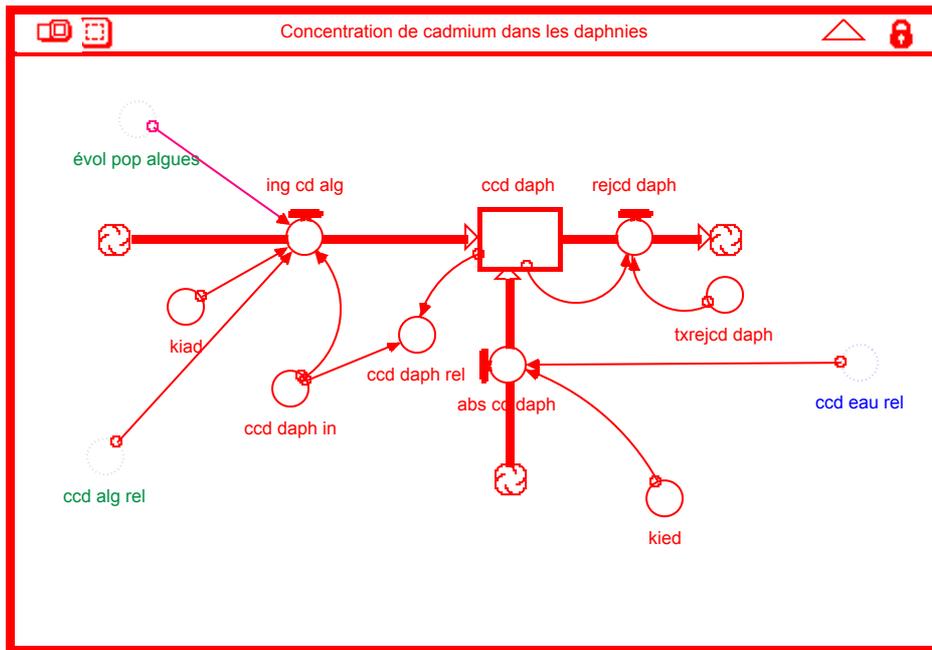


Fig. V.3.1

où on voit apparaître, pour les daphnies, deux sources possibles de pollution par le cadmium : venant de l'eau (absorption) et des algues (ingestion, on dit que les daphnies « broutent » les algues). Ce dernier flux de pollution par ingestion d'algues, est fonction à la fois de la concentration de cadmium dans les algues, mais aussi de l'évolution de population de ces dernières :

$$\text{ing\_cd\_alg} = \text{kiad} * \text{ccd\_alg\_rel} * \text{ccd\_daph\_in} * \text{evol\_pop\_algues}$$

{ingestion de cadmium par la voie alimentaire}

où  $\text{kiad} = .2$  est un coefficient d'ingestion d'algues par les daphnies

#### V – 4 – Concentration de cadmium dans les poissons

Nous retrouverons le même schéma représentant la concentration de polluant dans les poissons, qui boivent de l'eau - contenant plus ou moins de polluant – et se nourrissent de daphnies, elles-mêmes polluées par du cadmium.

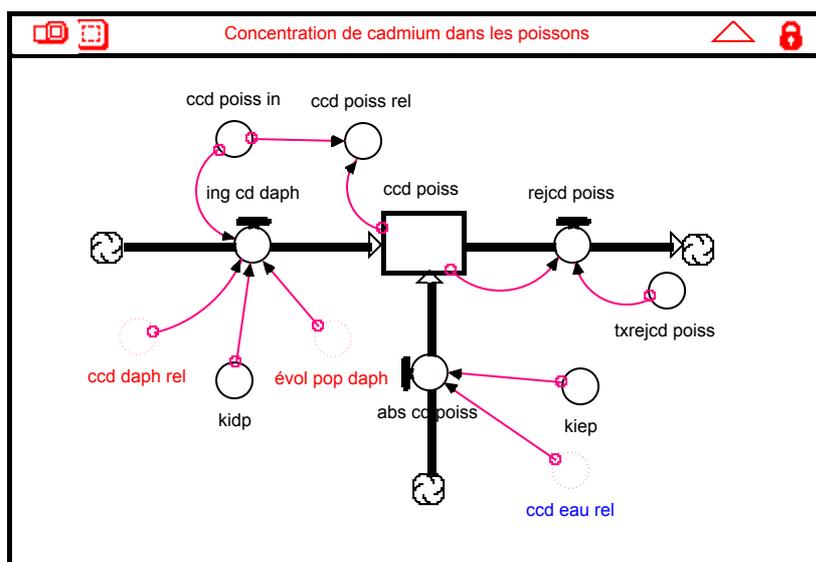


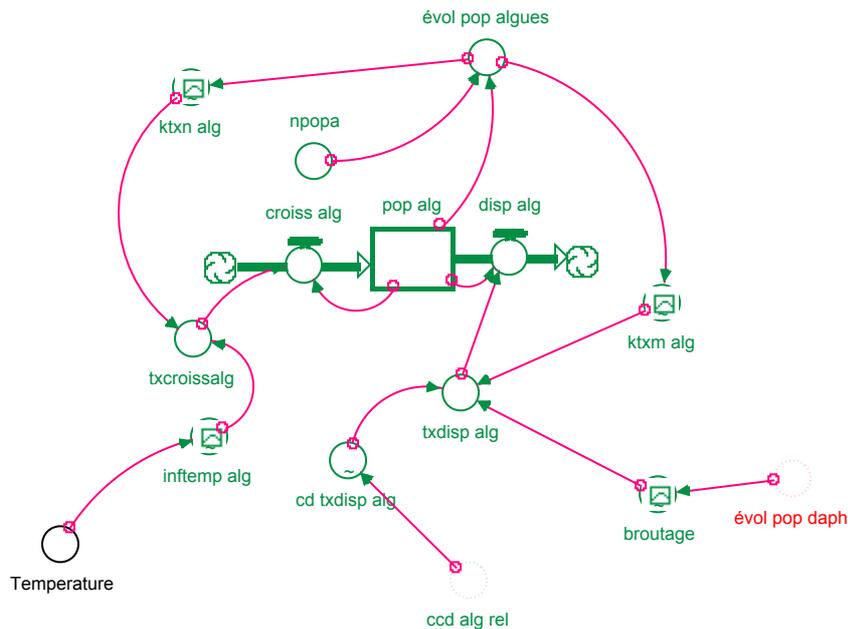
Fig. V.4.1

Nous avons maintenant quatre secteurs, simples mais interconnectés entre eux. Ce sont ces interconnexions qui sont, nous l'avons déjà dit, à l'origine de la complexité dynamique du système analysé, et que montre bien le diagramme causal que nous développerons un peu plus loin. De plus, lorsqu'on introduit les variables « évol pop daph » et « évol pop algues », représentant l'évolution des populations de daphnies et des algues, on se rend compte que ce sont des variables évolutives qui pourtant n'ont pas encore été définies. C'est ce que nous allons faire dans trois nouveaux secteurs représentant la dynamique intrinsèque des trois populations qui vivent dans le milieu aquatique qui nous concerne.

## V – 5 – Population d'algues

A première vue, ce secteur est très simple :

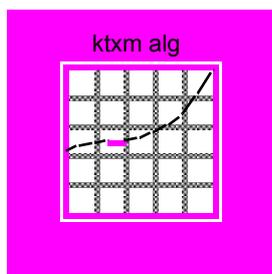
Au centre, la population des algues (pop alg) est typiquement une variable d'accumulation, influencée par les flux de croissance et de disparition, eux-mêmes directement proportionnels à la population. Le problème se complique toutefois lorsqu'on introduit les taux de croissance et de disparition des algues.



**Fig. V.5.1 : Schéma dynamique de la population des algues**

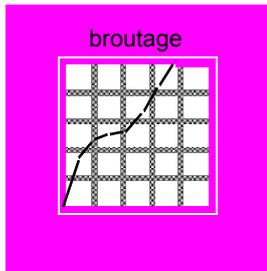
Ces taux ne sont pas constants, ils dépendent, chacun à sa façon, de la population des algues et des daphnies, «prédateurs» des algues.

Ainsi, le taux de disparition est représenté comme la somme de trois taux pouvant chacun varier en fonction de causes diverses : la population des algues mêmes (ktxm alg), la population des daphnies (broutage : plus les daphnies sont nombreuses, plus elles « broutent » d'algues), enfin la concentration du cadmium dans les algues (dans le cas présent, nous avons considéré que le cadmium n'est pas un poison pour les algues).



Taux de mortalité des algues (en ordonnées), fonction de l'évolution de leur propre population (en abscisses)

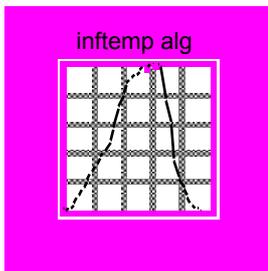
**Fig. V.5.2**



Facteur de mortalité des algues (ordonnées), dû au "broutage" par les daphnies, donc proportionnel à la population de celles-ci (abscisses)

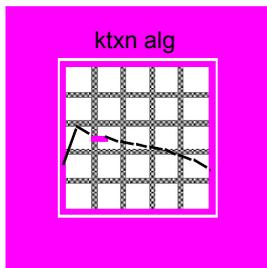
**Fig. V.5.3**

Quant au taux de reproduction des algues, il est lui aussi variable : il dépend d'une part de la température de l'eau (inftemp alg), d'autre part de l'évolution de la population des algues : une trop forte densité de population implique une baisse de reproduction, alors qu'une baisse de population en dessous d'un certain niveau d'équilibre engendre un regain de reproduction (une sorte de « baby-boom ») ; enfin, une trop faible population fait baisser le taux de reproduction.



Influence de la température de l'eau sur le taux de reproduction des algues, l'optimum se situant autour de 22°C

**Fig. V.5.4**



Influence de la population des algues (abscisses) sur leur propre taux de reproduction (ordonnées)

**Fig. V.5.5**

Notons que la courbe de la Fig. V.5.5, qui représente le résultat de nombreuses recherches et constatations expérimentales, constitue pour le modélisateur une représentation raccourcie d'un phénomène complexe,

raccourci qui remplace un sous-modèle qui pourrait lui-même être assez complexe. Un tel sous-modèle de l'influence de la population sur le taux de reproduction n'étant pas le but de l'analyse en cours, on préfère le remplacer par une courbe.

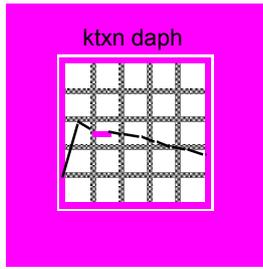
On remarquera sur la Fig. V.5.1 l'introduction de variables d'évolution de populations (évol pop algues, évol pop daph), définies comme l'évolution des populations correspondantes par rapport à leurs valeurs d'origine, ce qui permet de se passer d'une quantification exacte et de travailler autant que possible en valeurs et évolutions relatives.

## V – 6 – Population de Daphnies

Dans son principe, le schéma V.5.2 rappelle celui de la figure V.5.1. Il est toutefois plus complexe et met bien en évidence les multiples interactions entre secteurs.

Ainsi, le taux de naissance dépend ici de trois variables :

- la population de daphnies elle-même : une trop forte population tend à diminuer le taux de naissance, au contraire une certaine baisse de cette même population en dessous d'une valeur d'équilibre fait remonter les naissances (effet « baby boom »), sauf si la population est vraiment trop faible pour assurer le renouvellement (danger d'extinction).



Influence de la population des daphnies (en abscisses) sur leur propre taux de reproduction (en ordonnées)

Fig V.6.1

Les deux autres influences sur le taux de reproduction des daphnies sont :

- Le cadmium dont la présence tend, après un certain temps, à ralentir la reproduction (fonction graphique : cd daph txn daph)
- La température du milieu aquatique, dont la courbe d'influence (inf temp txnd) est à peu près la même que celle représentée sur la Figure V.5.4.

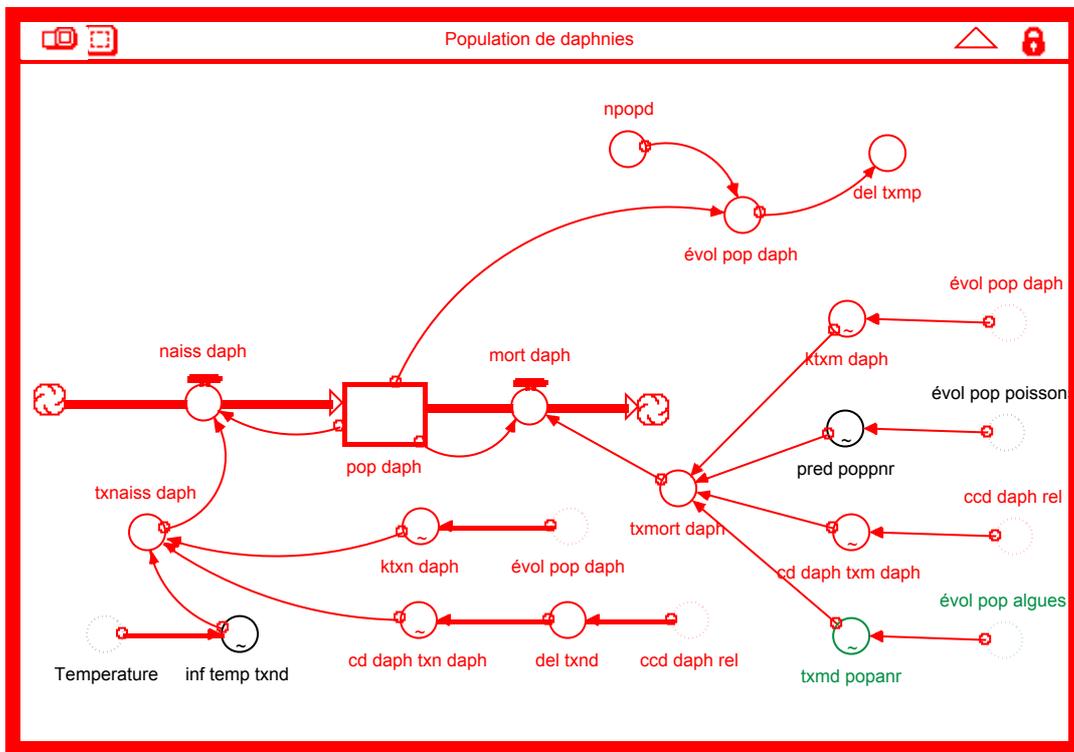
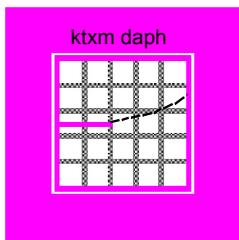


Fig. V.6.2 : Schéma dynamique de la population des daphnies

Il y a quatre types d'influence pouvant faire évoluer le taux de décès :

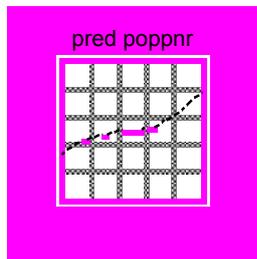
- la surpopulation des daphnies (influence à la baisse) :



Influence de la population de daphnies sur leur taux de mortalité

Fig V.6.3

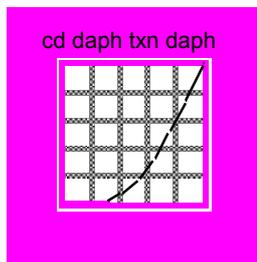
- population de poissons : le taux de disparition des daphnies est fonction du nombre de prédateurs :



Influence des prédateurs (les poissons)  
sur la population de daphnies

**Fig V.6.4**

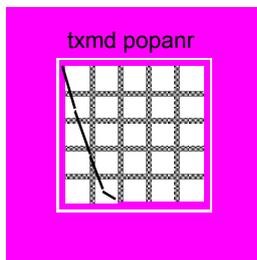
- la concentration de cadmium dans les daphnies :



Influence de la concentration de cadmium dans  
les daphnies, sur le taux de disparition de celles-ci.

**Fig V.6.5**

- l'évolution de la population d'algues, nourriture indispensable à l'existence et la survie des daphnies :

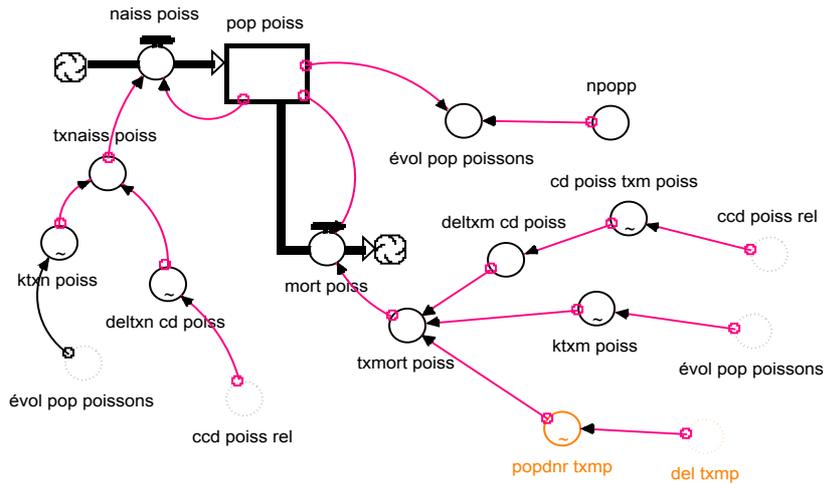


Influence de la population d'algues  
sur le taux de mortalité des daphnies

**Fig V.6.6**

Naturellement, toutes ces influences peuvent s'exercer simultanément ou successivement, en fonction de l'évolution du système. A ce niveau de complexité, nous ne pouvons ni ne devons préjuger des influences respectives, des interdépendances entre variables, des dynamiques possibles. Seul le modèle peut nous aider, nous guider dans notre analyse des évolutions, des comportements possibles ou probables.

## V – 7 – Population de poissons

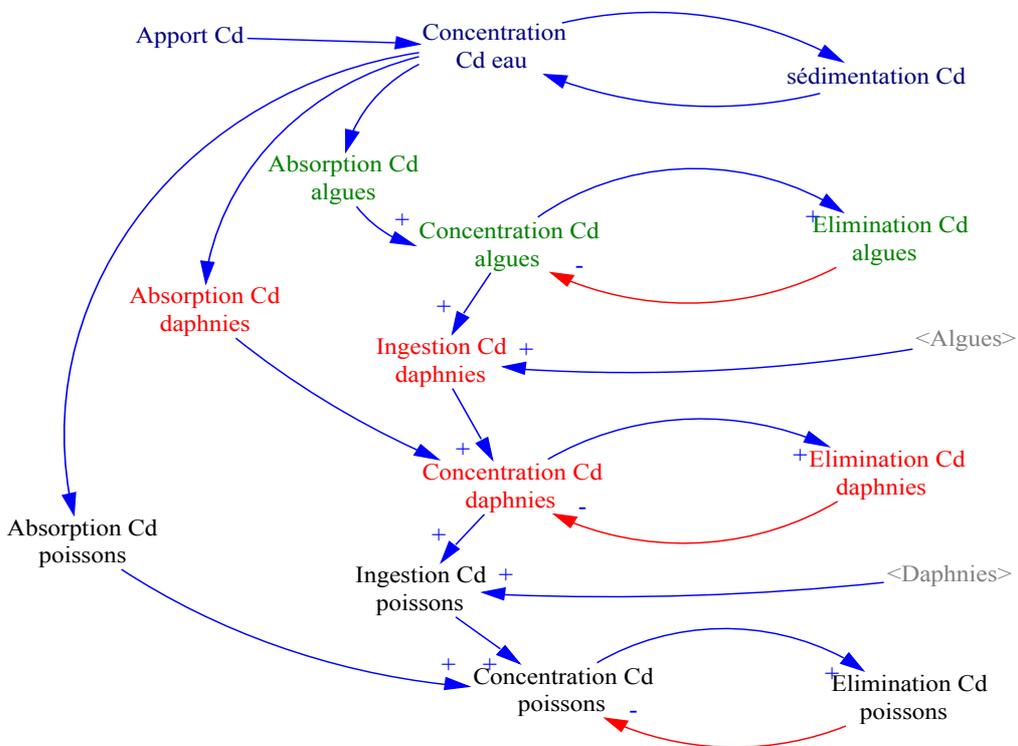


**Fig. V.7.1. : Schéma dynamique de la population de poissons**

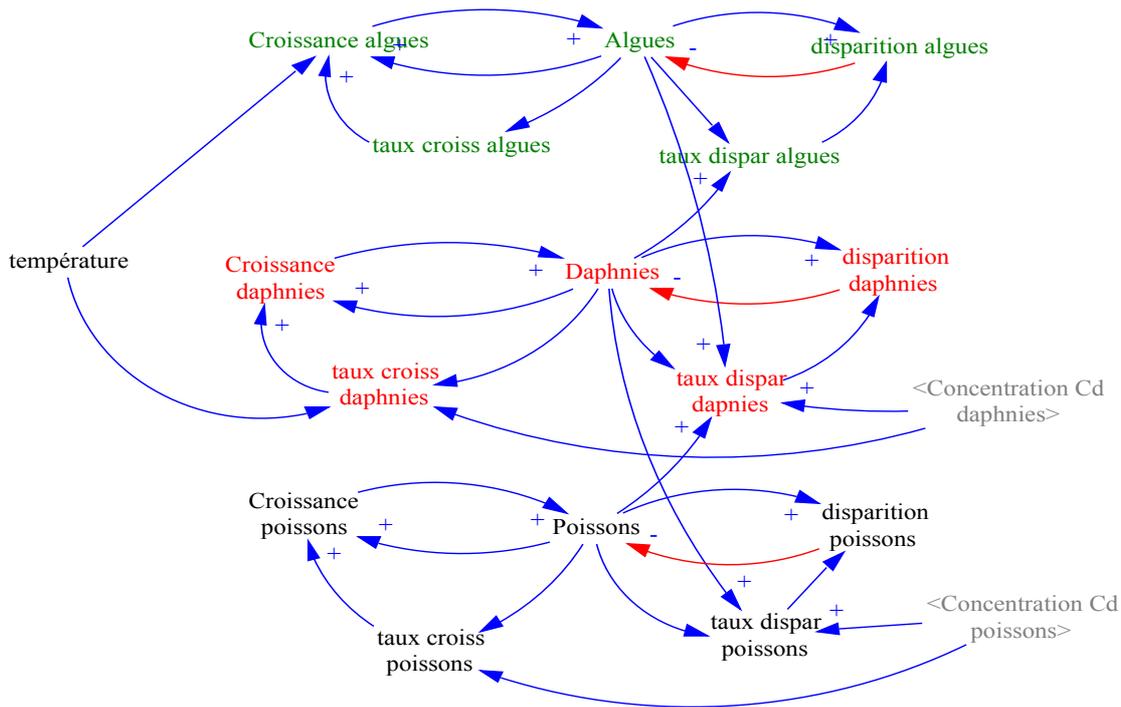
**V – 8 – Diagramme Causal**

On remarquera que, contrairement à nos habitudes, nous n’avons pas encore fait de diagramme causal du système considéré. Remédions à cette lacune, ne fut-ce que pour avoir une idée du nombre approximatif de boucles de rétroaction, nombre qui sera automatiquement calculé si le diagramme causal est réalisé à l’aide du logiciel VENSIM.

Pour des raisons de commodité, et afin de rester lisible, nous allons séparer le diagramme causal en deux parties, connectées naturellement entre elles. Le premier diagramme concernera les concentrations de cadmium dans l’eau, les algues, les daphnies et les poissons. L’autre diagramme causal représentera les secteurs des différentes populations. Dans ces deux diagrammes, nous essayerons d’utiliser des intitulés de variables proches de ceux utilisés dans les diagrammes dynamiques ci-dessus.



**Fig.V.8.1 : Diagramme causal 1 : les concentrations de Cadmium**



**Fig. V.8.2. : Diagramme causal 2 : les populations**

Le logiciel que nous avons utilisé pour tracer ces diagrammes causaux, calcule douze boucles passant par certaines variables, telle la population de daphnies, 9 boucles impliquant les populations de poissons ou d'algues, ce qui, comparé à certains modèles opérationnels d'entreprise, est faible (nous avons trouvé jusqu'à 1000 boucles et plus dans des modèles de taille importante mais parfaitement maîtrisables) mais qui explique déjà la complexité potentielle (que nous constaterons bientôt) des comportements possibles du système.

## V – 9 – Simulations

Voyons quelques résultats de simulation, en nous bornant à les décrire au moyen d'un seul graphique dynamique comportant toujours quatre courbes, à savoir :

courbe N°1 : population relative de daphnies (c'est-à-dire évolution de la population par rapport à sa valeur d'origine)

courbe N° 2 : population relative de poissons (évolution par rapport à la valeur d'origine de cette population)

courbe N° 3 : population relative d'algues (même remarque)

courbe N° 4 : concentration relative de polluant (cadmium) dans l'eau (relative par rapport à sa valeur d'origine)

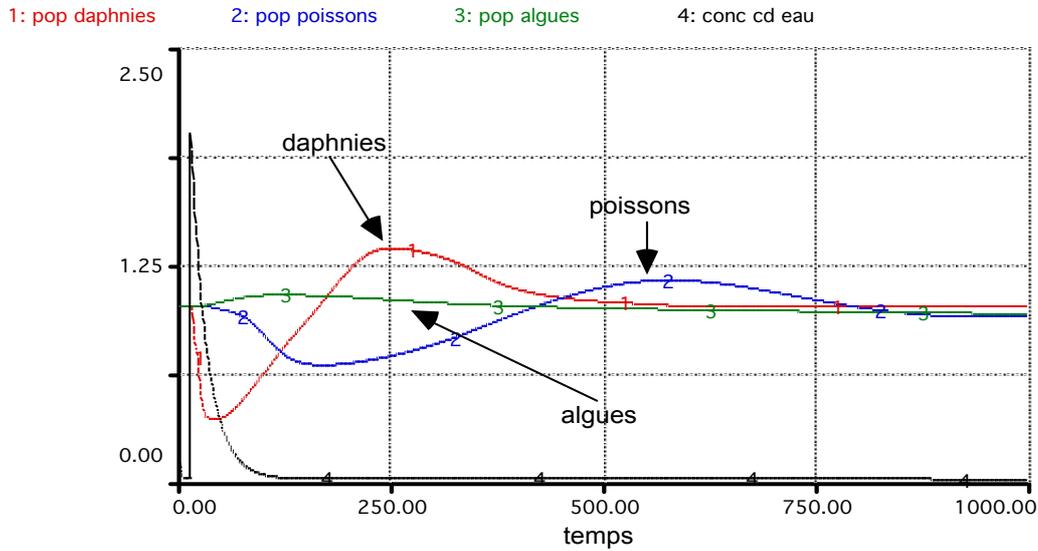
Comme dans tous les modèles de Dynamique des Systèmes, toutes les variables du modèle sont disponibles et peuvent être représentées et analysées sur des graphiques spécifiques. C'est naturellement ce que fait tout modélisateur pendant la phase de mise au point d'un modèle, c'est aussi ce que font les utilisateurs de ces modèles, lorsque apparaît un problème ou un phénomène a priori non expliqué.

Il est important de noter (nous y reviendrons) qu'il ne s'agit pas à ce stade, de simuler exactement la réalité, mais surtout de montrer la possibilité d'apparition de phénomènes surprenants, inattendus. S'intéressant exclusivement aux modes de comportement, on ne s'attachera nullement à expliquer et justifier l'amplitude des phénomènes ou leurs délais d'occurrence et d'évolution.

Face à une pollution de plus ou moins forte amplitude, mais toujours de durée brève (la nature du polluant pouvant être, par exemple, un métal lourd comme le cadmium), on observe schématiquement quatre types de réactions de l'écosystème.

Les comportements extrêmes, les plus fréquents et les plus faciles à analyser, sont les deux suivants :

1 - assez faible niveau de pollution (fig.V.9.1) : le milieu, caractérisé par les niveaux de populations d'algues, de daphnies et de poissons, réagit plus ou moins fortement, avec des délais différents selon les populations, puis se restabilise à un niveau comparable à celui de son état initial.

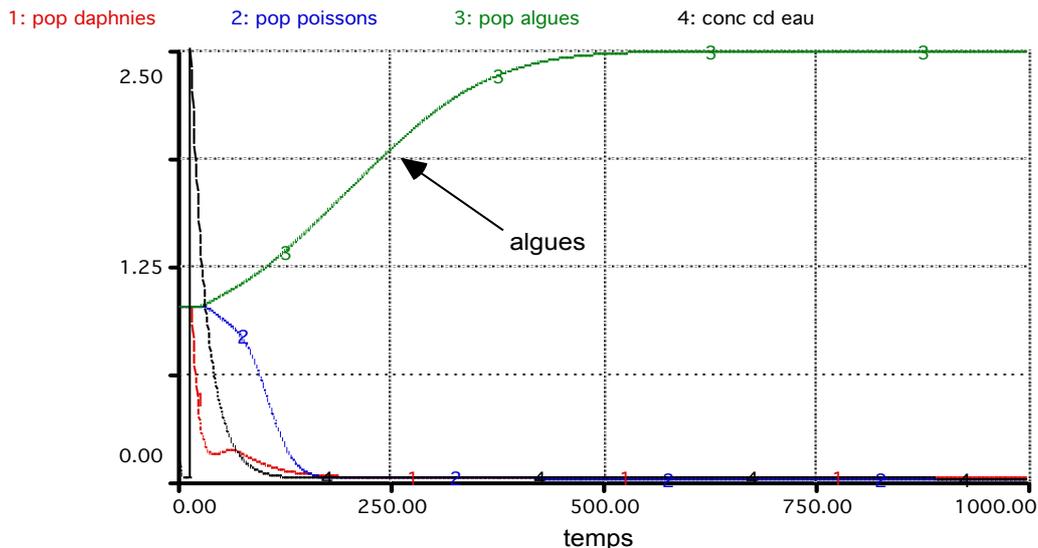


**Fig. V.9.1 : Retour à l'Équilibre**

2 - très forte pollution (Fig. V.9.2) : comme cela est facilement prévisible, une très forte pollution, même brève, a des conséquences catastrophiques sur la première population sensible au polluant, dans notre cas les daphnies.

Une trop forte concentration de cadmium, même temporaire, entraîne à la fois une forte baisse de natalité et une augmentation de la mortalité des daphnies, dont la baisse de population en deçà d'un certain seuil (dit de renouvellement), entraîne à son tour, par un phénomène de "cercle vicieux" (boucle positive catastrophique), une nouvelle baisse de natalité rendant impossible une remontée naturelle de la population concernée.

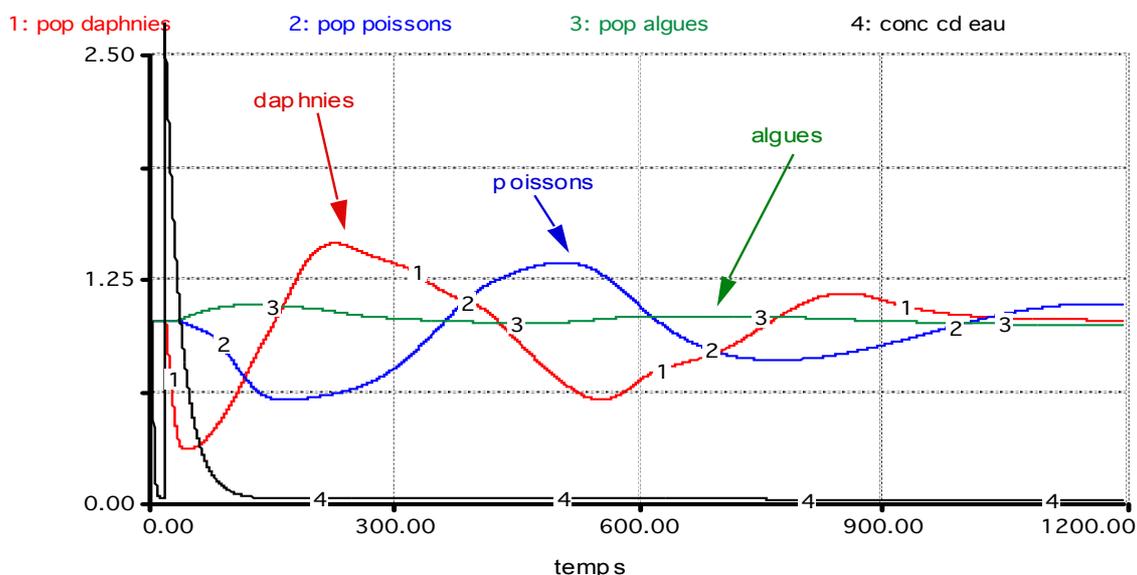
Les daphnies une fois disparues, les poissons n'ont plus de nourriture et disparaissent rapidement eux aussi, laissant les algues maîtresses du milieu aquatique.



**Fig. V.9.2 : Pollution "Catastrophique"**

Ces deux comportements extrêmes ne sont pas surprenants, on les retrouve fréquemment dans de nombreux cas réels de pollution. Ils peuvent se résumer par un mécanisme de tout ou rien : retour à l'équilibre ou disparition.

3 - Oscillations amorties (Fig. V.9.3) : Le troisième scénario, intermédiaire entre les précédents, n'est pas non plus pour nous surprendre, car il a déjà été rencontré dans la réalité. Il s'agit d'un comportement oscillatoire amorti : en réponse à un brusque et bref incrément de pollution de forte amplitude, les niveaux de population des algues, des daphnies et des poissons présentent des mouvements oscillatoires qui ne s'amortissent que lentement, bien après la fin de l'incident ayant provoqué la pollution, et alors même que cet incident a depuis longtemps, sans doute, été oublié.



Remarque : nous avons volontairement prolongé le temps de simulation jusqu'à 1200 unités de temps.

**Fig. V.9.3 : Comportement Oscillatoire**

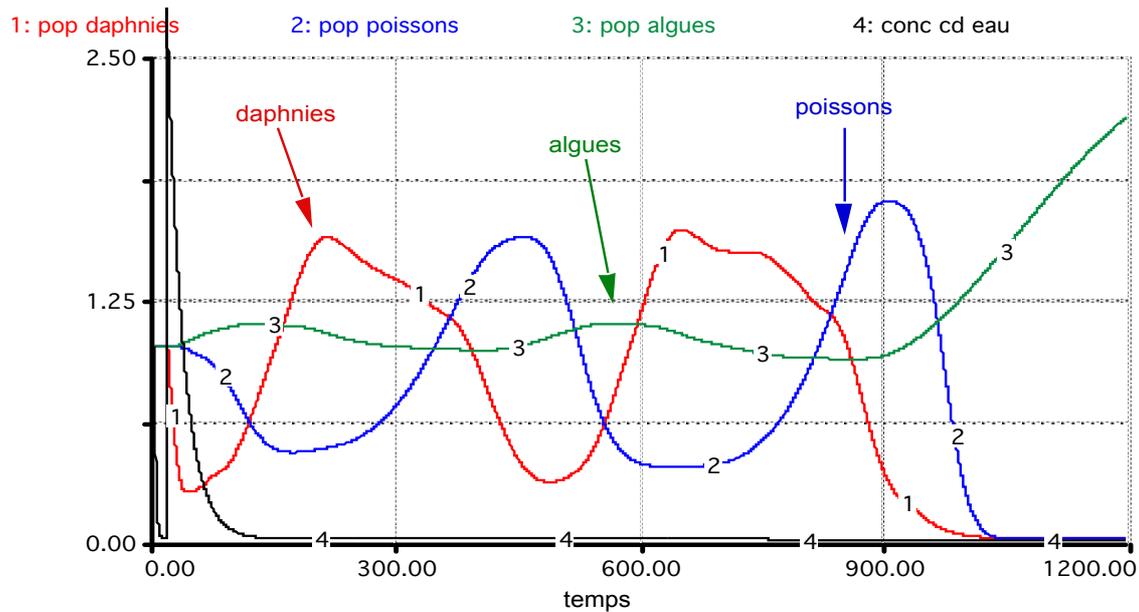
#### 4 - Catastrophe différée (Fig.V.9.4)

Le quatrième scénario, quant à lui, est tout à fait surprenant ; c'est lui qui constitue, en fait, l'objet de ce chapitre.

En partant du troisième scénario (oscillations amorties) et en augmentant très légèrement l'incrément de pollution : +1 à +2%, on obtient soudain un changement de comportement.

Le niveau de pollution restant inférieur à celui du scénario catastrophique, la population de daphnies n'atteint pas le seuil critique de renouvellement, et peut remonter, ceci d'autant plus rapidement qu'il y a moins de poissons pour les manger. Les daphnies se trouvent bientôt en situation de surpeuplement (qui d'ailleurs aurait tendance à se limiter de lui-même par baisse de la natalité et augmentation de la mortalité), ce qui favorise à terme le repeuplement des poissons (nourriture abondante favorisant les naissances ainsi que les flux migratoires). Celui-ci se fait très rapidement - dynamique trop rapide, mais dont personne n'est maître - au dépens des daphnies. Cette fois, c'est le surpeuplement des poissons qui décime la population de daphnies, à tel point qu'on atteint à nouveau, au bout de deux cycles, mais pour une raison différente cette fois, le seuil critique de renouvellement des daphnies... qui disparaissent pour de bon, entraînant les "trop gourmands" poissons dans leur sillage, et laissant cette fois encore, les algues maîtresses des lieux.

On se trouve devant une situation de catastrophe différée, ou encore à retardement : disparition de deux des trois espèces peuplant le milieu aquatique considéré, mais ceci longtemps après la fin de la cause première de pollution, alors même que tout donnait à croire que la situation "écologique" était en train de se rétablir et que l'on pouvait se permettre d'oublier l'incident original.



**Fig. V.9.4 : Catastrophe Différée**

Notons qu'une mesure statique des populations, aux environs des temps 400 et 800, donnerait une illusion de stabilité et d'équilibre...illusion seulement, puisqu'on voit, sur notre diagramme dynamique, combien l'avenir est « sombre », au moins pour deux des trois populations concernées.

## V – 10 - Analyse de la CATASTROPHE DIFFÉRÉE

V – 10 - 1 - Dans notre modèle, une telle situation de catastrophe différée n'apparaît que pour une très faible zone de variation du niveau de pollution. En fait, ce n'est que par hasard que nous avons pu découvrir et analyser ce phénomène. Le risque d'une telle "catastrophe" est sans doute assez faible, mais non négligeable, d'autant que la plage de risque peut varier fortement selon l'environnement, le polluant, les espèces, etc. Sans la possibilité de simuler le phénomène de pollution, nous n'aurions pas découvert cette zone particulière de comportement.

V – 10 - 2 – Au début de cette étude, lorsque ce phénomène de catastrophe différée est apparu pour la première fois, nous avons cru à une erreur de manipulation ou, pire, à une erreur du modèle. Nous pensons d'ailleurs qu'il est bon de mettre d'abord en cause le modèle, avant de soupçonner une réalité inattendue et d'expliquer des résultats contre-intuitifs...qui n'en sont peut-être pas. Il est plus fréquent de rencontrer des modèles faux que de se heurter à des comportements réels contre-intuitifs et inattendus. Puis nous avons dû nous rendre à l'évidence : le modèle n'était pas en cause, ce type de « catastrophe différée » apparaissait quelque soient les paramètres (et le nombre d'espèces considérées : cf. plus loin), il semblait bien y avoir une zone de fonctionnement dans l'espace des comportements possibles, qui corresponde à la « catastrophe différée ».

Par acquis de conscience, et pour satisfaire notre curiosité, nous avons montré ce phénomène à un spécialiste de la théorie qualitative des systèmes dynamiques non-linéaires, Javier ARACIL, professeur à l'Université de Séville. Celui-ci a alors démontré (Aracil J., Ponce E., Pizarro L. (1997) Behavior patterns of logistic models with delay, *Mathematics and Computers in Simulation* 44, pp. 123-141) que l'apparition de la « catastrophe différée » était normale et quasi inévitable dans une certaine plage de valeurs des paramètres. C'est en fait le type de schéma représenté sur la figure V.10.2, qui peut créer un pôle d'attractivité catastrophique (implosion vers zéro) différent du pôle d'attractivité autour duquel se stabilise d'habitude le système

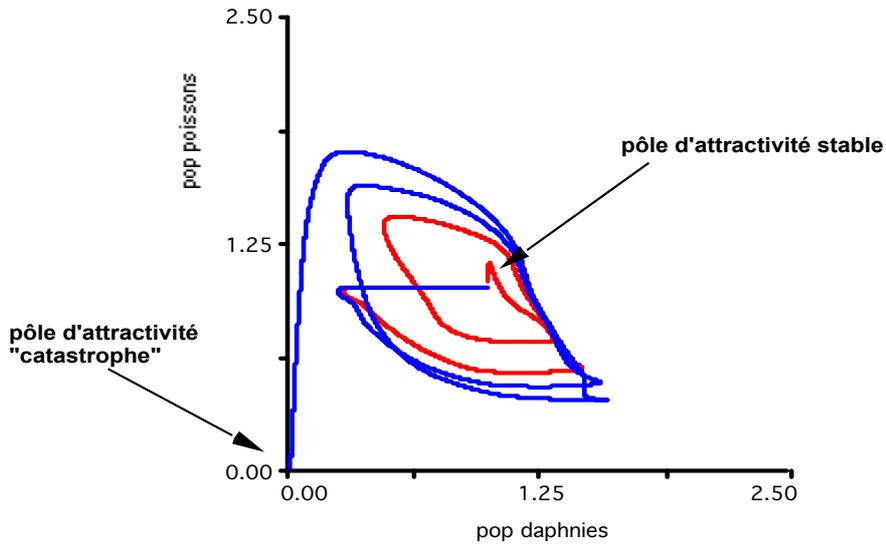


Fig.V.10.1

Dans le schéma qui suit, trois éléments concourent à créer la possibilité d'apparition d'un deuxième pôle d'attractivité, un pôle d'implosion :

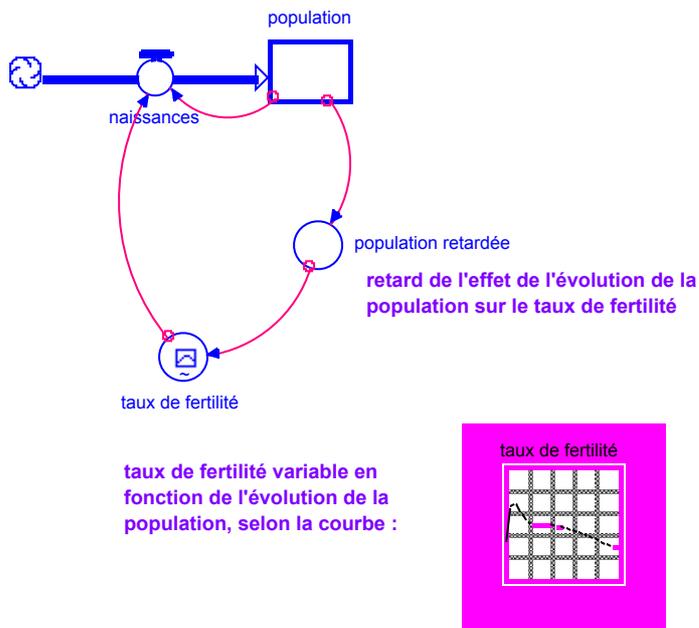


Fig.V.10.2

- 1 - la présence d'une rétroaction non-linéaire entre une variable d'accumulation – ici la population – et un des flux qui l'alimente – les naissances -.
- 2 – cette rétroaction non-linéaire présente une forme concave pour une partie au moins de la courbe.

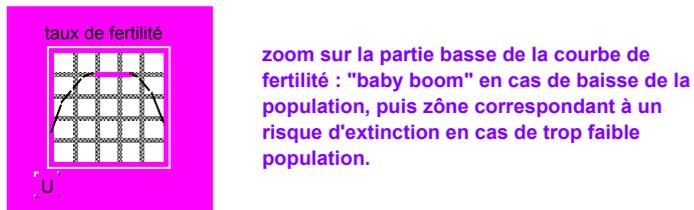


Fig.V.10.3

3 – il existe un délai entre l'information concernant la variable d'accumulation, et son effet sur le flux d'entrée. C'est le cas dans notre exemple : il faut un certain temps pour qu'un changement de population ait un effet sur la fertilité.

Pour résumer, si les conditions ci-dessus sont satisfaites, on peut assurer qu'il existera une plage dans l'ensemble possible de valeurs des paramètres, qui pourra induire un comportement de type « catastrophe différée » (il nous a été rapporté qu'un tel comportement apparaît de façon répétée dans certains lacs d'Afrique). Dans de nombreux cas, ces paramètres se situent dans une zone jamais atteinte, peut-être impossible à atteindre, sans doute irréaliste.

V – 10 - 3 – Mais la possibilité même d'observer un tel comportement à retardement implique que certaines causes de catastrophes peuvent parfois être bien antérieures à la date d'apparition de la catastrophe proprement dite (dans un article écrit en anglais sur ce sujet, nous avons sous-titré l'article : could it have happened to dinosaurs ?). Et, rappelons-le, une situation apparemment rétablie peut dégénérer - pour des raisons de dynamique structurelle (association de phénomènes de temporisation et de décrochement) - en une catastrophe alors même qu'on ne s'y attendait plus.

V – 10 - 4 - A contrario, certaines catastrophes peuvent ne pas résulter de causes directes apparentes, mais être la conséquence - structurellement inéluctable mais difficile à mettre en évidence - d'incidents antérieurs depuis longtemps oubliés, sinon même passés inaperçus.

### V - 11 - Une autre Catastrophe

Un dernier scénario inattendu montrera combien un outil de simulation peut aider à mettre en évidence des situations contrastées et difficiles à prévoir. Revenons à notre analyse de pollution aquatique et, partant de l'incident de pollution qui avait généré la "catastrophe différée", accroissons encore de 1 à 2% le niveau de pollution soudaine de l'eau. La simulation montre un résultat entièrement différent (Fig.V.11.1) :

La très forte baisse de population de daphnies entraîne la disparition des poissons par manque de nourriture. Mais les daphnies, n'ayant pas atteint le seuil fatal de disparition (le retournement de la courbe de natalité en fonction de la population), peuvent se reproduire et se développer sans craindre d'être mangées, avec pour seules limitations leur propre surpopulation et une nourriture insuffisante (baisse de la population d'algues). On assiste là, à un nouveau scénario dont les résultats sont très contrastés par rapport au précédent, mais qui est tout aussi plausible.

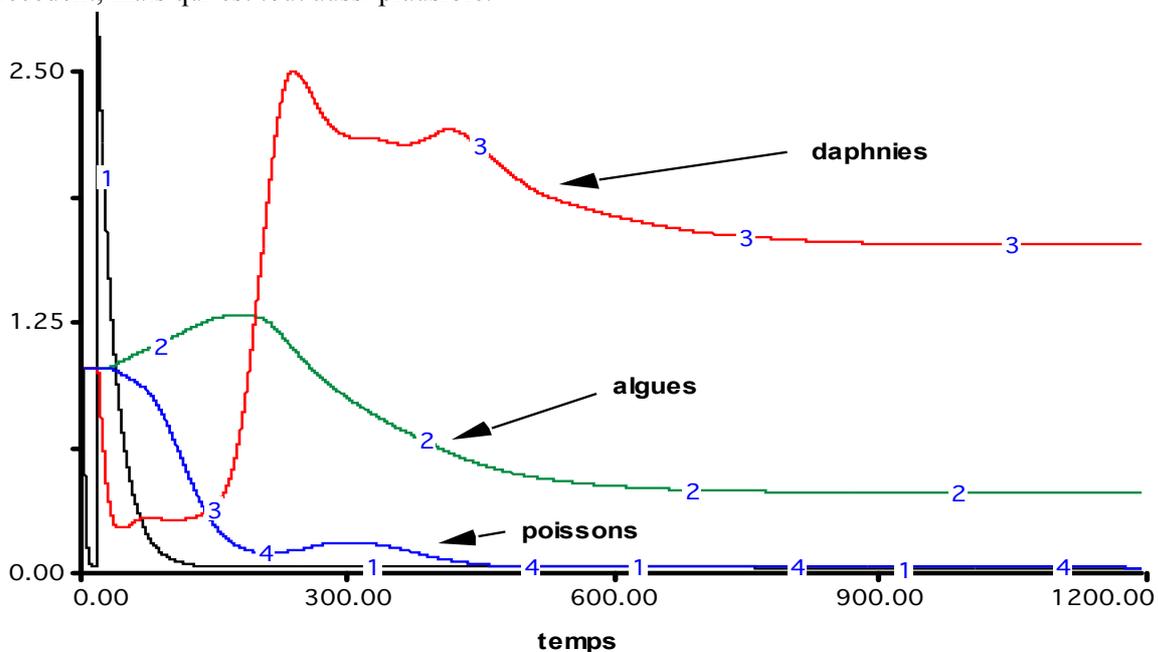


Fig.V.11.1

## V – 12 - Analyse Critique et Développements

On peut se demander s'il est bien réaliste de modéliser un environnement aquatique ne comportant qu'une seule population de daphnies et un seul type de poissons. S'il y a plusieurs populations de daphnies et de poissons, les résultats obtenus subsisteront-ils ? N'y aura-t-il pas stabilisation de l'écosystème, et disparition de ces phénomènes de catastrophe différée ?

Pour s'en assurer, nous avons, dans un premier temps, doublé le système en introduisant un deuxième type aussi bien de daphnies que de poissons, ayant des caractéristiques différentes des premiers. Sans vouloir entrer dans le détail des simulations réalisées, disons seulement que les modes de comportement inattendus subsistent et même se compliquent ; seule la zone de sensibilité des paramètres se déplace en se déformant.

Ainsi on peut voir disparaître un type de daphnies (daphnies 1) ainsi que tous les poissons, au bénéfice de l'autre sorte de daphnies (daphnies 2)

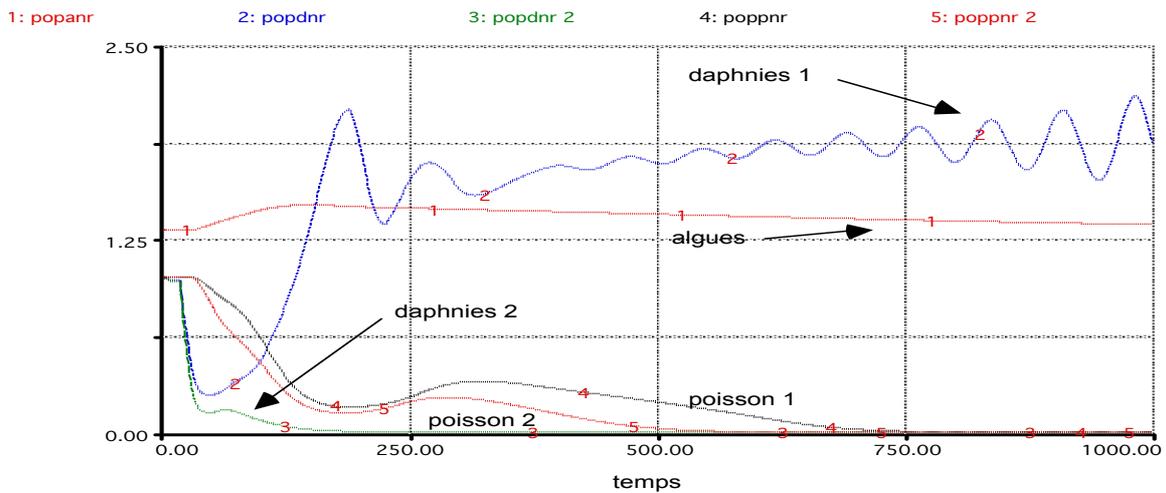


Fig.V.12.1

ou bien on peut voir subsister daphnies 1 et poissons 1 et disparaître les autres

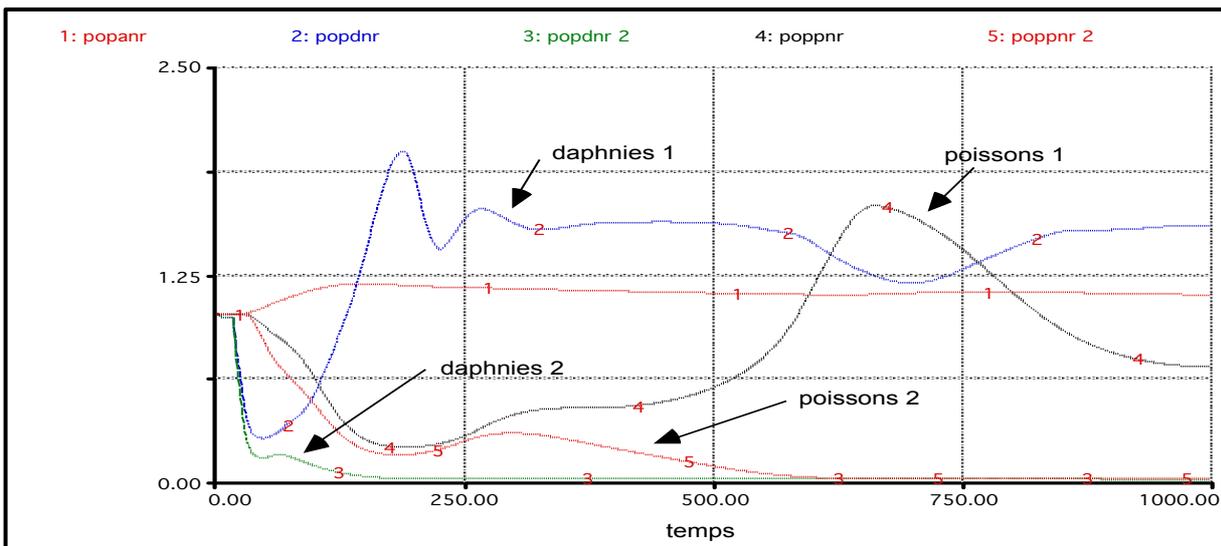


Fig.V.12.2

ou inversement subsister daphnies 1 et poissons 2

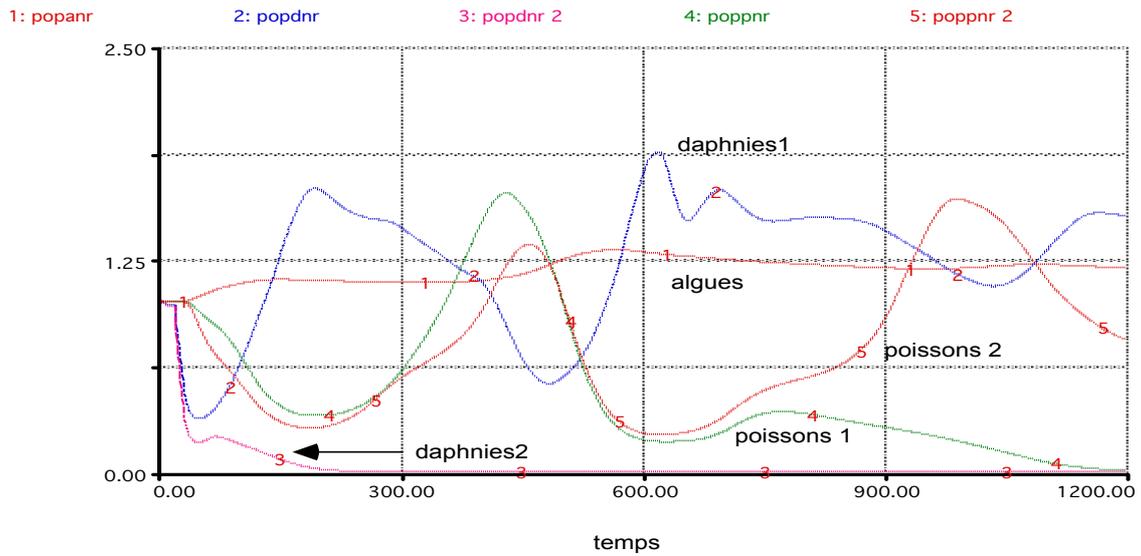


Fig.V.12.3

ou retrouver pour l'ensemble des populations le phénomène de catastrophe différée analysé ci-dessus.

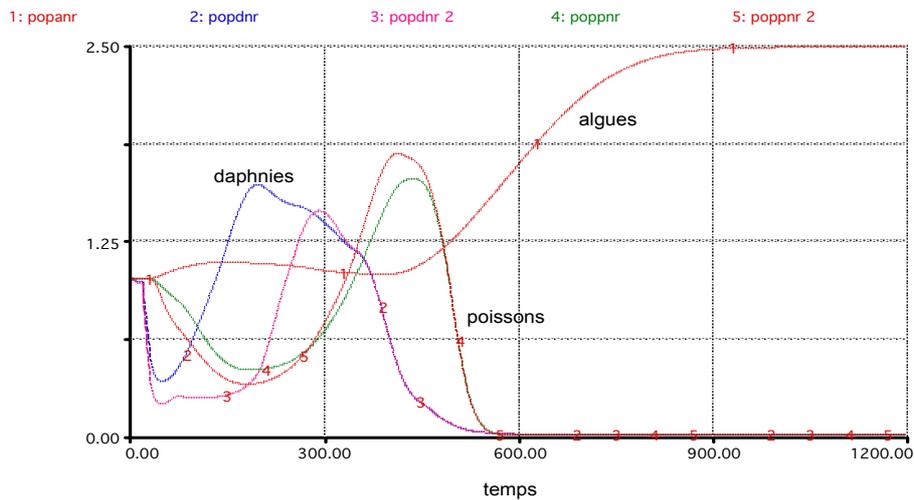


Fig.V.12.4

Ces résultats, en apparence très différents les uns des autres, ont tous en commun de faire ressortir la possibilité de résultats surprenants, inattendus, contre-intuitifs a priori. Ceci justifie pleinement l'utilisation de simulations, toujours moins onéreuses, plus faciles et plus rapides à réaliser que des expérimentations réelles, et surtout non destructives et ne portant pas à conséquence.

## VI - La Modélisation comme aide au Management

Les deux prochains exemples sont destinés à montrer non plus des résultats surprenants, mais l'apport de la modélisation et de la simulation, à la compréhension et au pilotage de structures et de projets complexes.

Le système - complexe s'il en fut - est celui du management, que ce soit celui de l'économie, de projets importants, de structures d'information/décision, ou enfin le management des hommes, le plus complexe de tous.

Certains de ces exemples seront traités en détail (comme le modèle environnemental précédent), allant du principe aux équations, d'autres seront décrits plus succinctement, de façon surtout à donner une idée de ce qui peut être poursuivi dans le domaine correspondant.

En premier lieu, nous présenterons, à notre manière évidemment, et de manière relativement succincte, le concept reconnu mais peu exploité d'évolution dynamique de l'information utilisée dans le cadre du management d'entreprise, concept au sujet duquel nous utiliserons le sigle IDAR : Information, Décision, Action, Résultat.

Puis nous appliquerons successivement la Dynamique des Systèmes au processus de gestion de projets complexes et importants – en allant cette fois dans le détail de la modélisation – et à l'analyse de la dynamique d'un marché de matière première : le pétrole. Nous montrerons aussi comment modéliser un processus d'investissement et de développement de moyens de production.

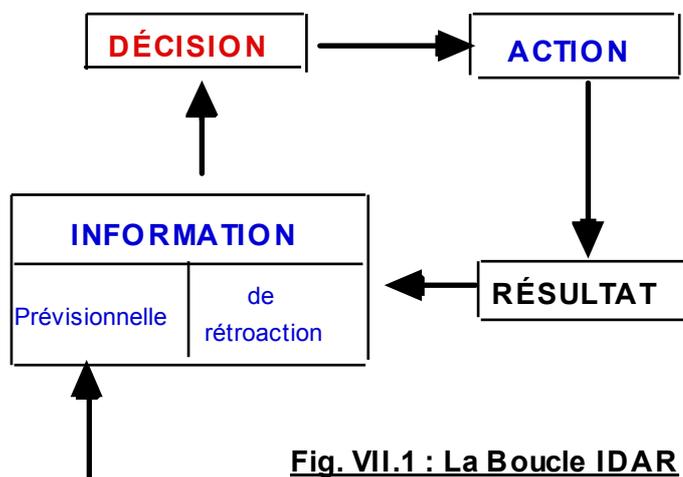
Enfin, nous montrerons comment analyser et modéliser un aspect essentiel – mais inattendu – du management, à savoir la motivation humaine au sein de l'entreprise.

Ces exemples montrent la diversité des applications possibles de notre démarche systémique, sa richesse aussi et son intérêt pratique pour une meilleure compréhension et une interprétation fiable et cohérente des comportements possibles des systèmes considérés.

## VII – Une Application dans le domaine Informationnel

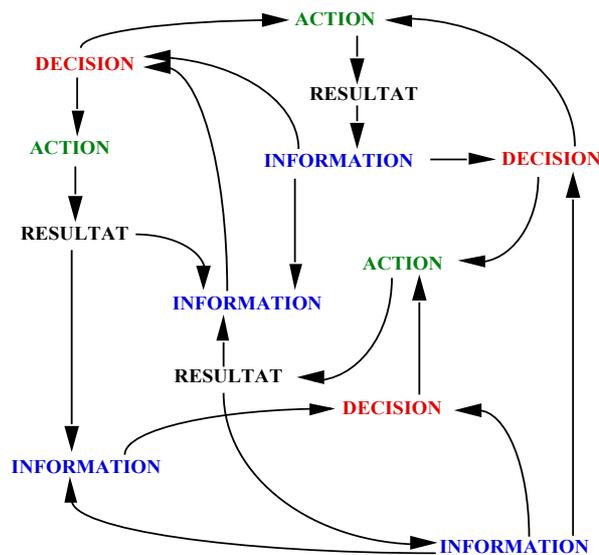
### La boucle IDAR

Toute structure fonctionne à partir d'informations qui sont à la base des décisions (explicites ou non) qui font évoluer le système. Telle quelle, cette phrase peut sembler tautologique. Elle ne fait, pourtant, que refléter l'existence d'une boucle de rétroaction. Les informations dont il est question, qui servent à piloter, à gérer une entreprise, ne sont ni figées, ni immuables, elles changent en fonction d'événements extérieurs, mais aussi en conséquence de décisions, d'actions, de résultats, bref selon l'évolution interne de nombreux éléments du système. C'est cette boucle que nous appelons IDAR (Information - Décision - Action - Résultat).



**Fig. VII.1 : La Boucle IDAR**

Dans un système réel, il n'y a pas une, mais de nombreuses boucles IDAR imbriquées, reliant les multiples informations pouvant influencer une décision, ainsi que les nombreuses décisions menant à l'action et, éventuellement, à des résultats.



**Fig. VII.2 : Un ensemble de boucles IDAR imbriquées**

Cet entrelacs de boucles IDAR, explique la difficulté qu'il y a à analyser et comprendre a priori le comportement du système correspondant et d'en prédire les évolutions.

Face à un tel schéma, il faut se poser deux types de questions :

- 1 - quelles sont les informations importantes dans le contexte de la structure IDAR existante?
- 2 - peut-on modifier cette structure pour en améliorer le comportement et les résultats ?

Il est clair que tenter de répondre à ces questions exige d'abord un investissement dans la description et l'analyse de la structure IDAR existante. Un tel effort requiert du temps mais surtout une honnêteté intellectuelle et un certain courage pour accepter de mettre à plat sa propre structure d'information, source de pouvoir, de succès mais aussi d'échecs.

Une fois cet effort fait, la modélisation d'une structure IDAR ainsi que l'utilisation du simulateur correspondant, permettront des gains de temps et d'argent considérables. Et surtout, nous ne le répèterons jamais assez, un tel simulateur donne la possibilité d'inventer et de tester des solutions nouvelles sans danger, sans risque de perturbation ou même de destruction du système réel. Un simulateur représente une réalité virtuelle que l'on peut modifier, modeler, décomposer à volonté sans que cela ait quelque effet que ce soit sur la réalité. Lorsque cette réalité implique la vie même de l'entreprise, utiliser un simulateur peut éviter bien des désagréments majeurs !

Se poser la première question, à savoir : "quelles sont les informations importantes" ? revient à se demander "quelles sont les dégradations d'information tolérables" ?

On peut citer, en première analyse, quatre types de dégradation d'information :

- l'erreur aléatoire,
- la distorsion (volontaire ou pas),
- l'échantillonnage (y-a-t-il une fréquence optimale d'émission, de réception, de traitement de l'information ?)
- le délai ou retard (faut-il toujours réduire le délai d'acquisition et de traitement de l'information ?)

ce qui nous amène à redessiner la boucle IDAR en mettant en évidence les dégradations possibles d'information (et en se souvenant qu'un système réel est constitué de nombreuses boucles de ce type, chacune avec sa ou ses dégradations d'information).

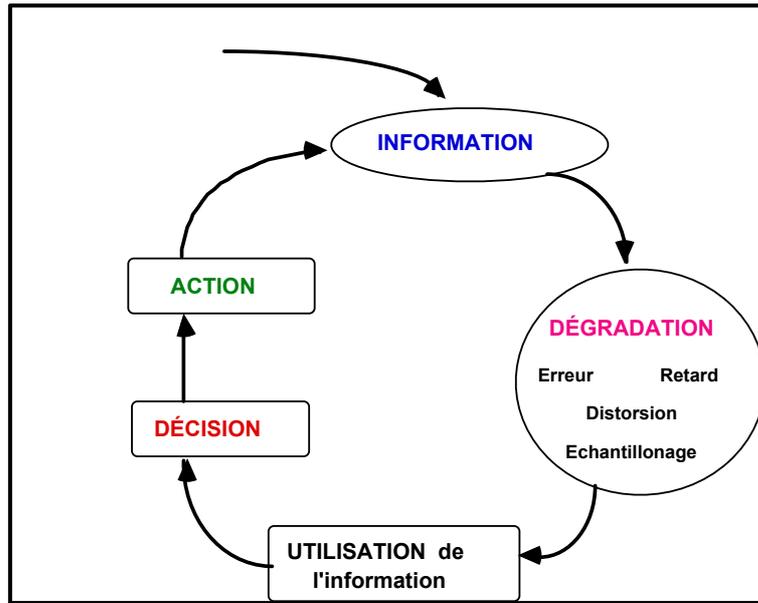


Fig. VII.3 : Circuit : INFORMATION - DÉCISION - ACTION

## V - 2 - Structure Canonique du Système d'Information

Si l'on développe un peu l'analyse de la boucle IDAR, on constate qu'au sein d'une structure informationnelle apparaissent deux types de boucles :

- les boucles IDAR classiques faisant intervenir les fonctions d'action et de décision,
- les boucles liées au contrôle des activités de la structure en question.

Nous pouvons donc définir trois grandes fonctions "actives" :

- la fonction Décision et la fonction Action, issues directement de la boucle IDAR classique,
- la fonction Contrôle, celui-ci s'exerçant à la fois sur les activités de décision et sur les activités d'exploration.

d'où le schéma de principe que nous verrons se développer et se compliquer rapidement dans les pages qui suivent :

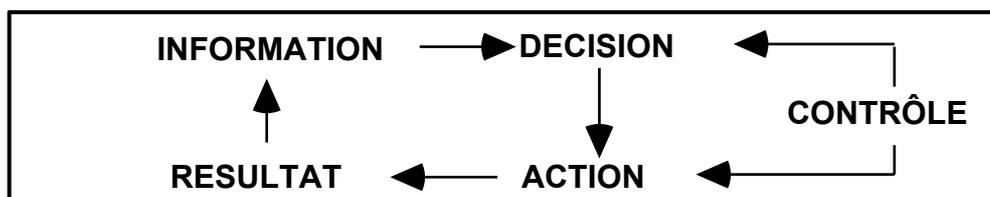


Fig.VII.4

### V - 2 - 1 - Les fonctions Action

Sachant que ces fonctions ont pour origine une ou plusieurs fonctions Décision, on peut distinguer entre :

- les actions nécessitant un fort investissement (par exemple, dans le secteur pétrolier qui nous servira de base pour nos exemples : "réaliser des forages"),
- les actions dont le but se limite à une acquisition d'information sur l'environnement (par exemple "réaliser des études de terrain") et qui requièrent généralement un investissement moindre,
- les actions visant à traiter l'information acquise afin de la rendre exploitable (par exemple "effectuer des travaux de synthèse").

D'où la répartition des fonctions d'action en trois groupes :



### V - 2 - 2 - Les fonctions Décision

Celles-ci étant à l'origine des fonctions Action, il en découle le schéma suivant :

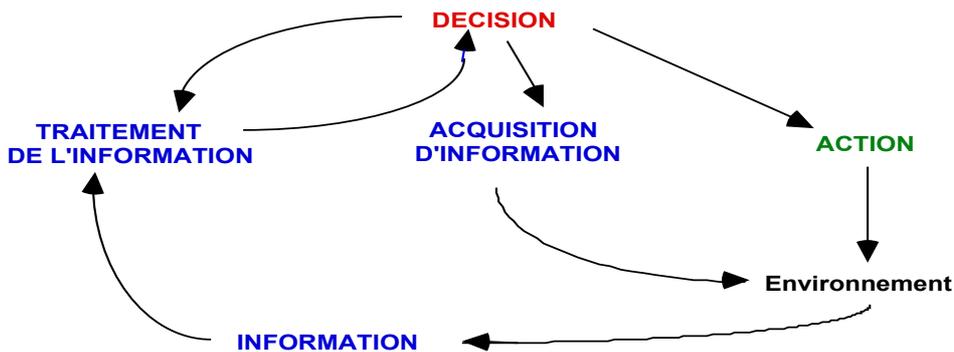


Fig. VII.5

### V - 2 - 3 - Les fonctions Contrôle

Un contrôle - bon ou mauvais - est toujours exercé sur les activités de n'importe quel système. Par exemple, si l'on en reste à l'exploration pétrolière, un contrôle s'exercera sur :

- la politique d'exploration et ses incidences éventuelles (DECISION)
- les méthodes de forage employées et les résultats correspondants (ACTION)
- le savoir-faire en matière d'étude de terrain, de géophysique, de campagnes sismiques (ACQUISITION D'INFORMATION)
- la validité des interprétations des résultats des forages et des campagnes sismiques ainsi que des travaux de synthèse (TRAITEMENT).

Nous regrouperons sous l'appellation "Moyens, Contrôle, Gestion", l'ensemble des moyens mis en oeuvre pour contrôler les différentes activités d'un système donné, dans le but d'assurer un bon fonctionnement interne de ce système (sous-entendu : l'entreprise). Quel que soit son efficacité (dépendant d'un accès réel aux informations), cette fonction de contrôle est centrale dans l'activité d'une entreprise (Fig. VII.6).

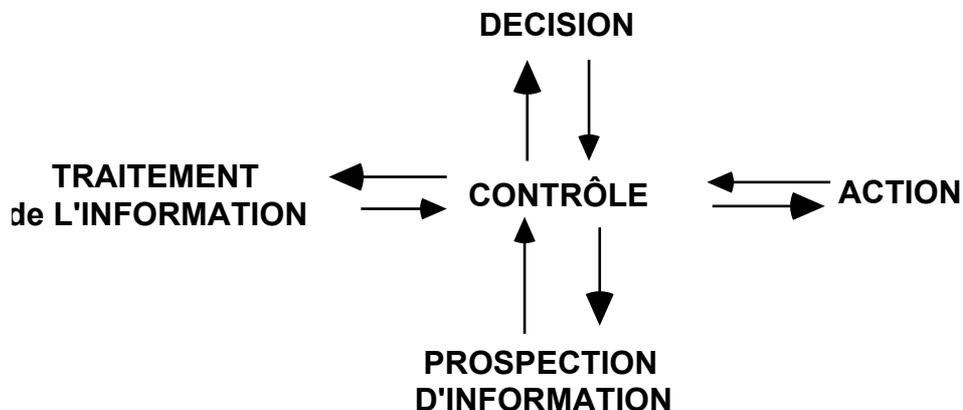
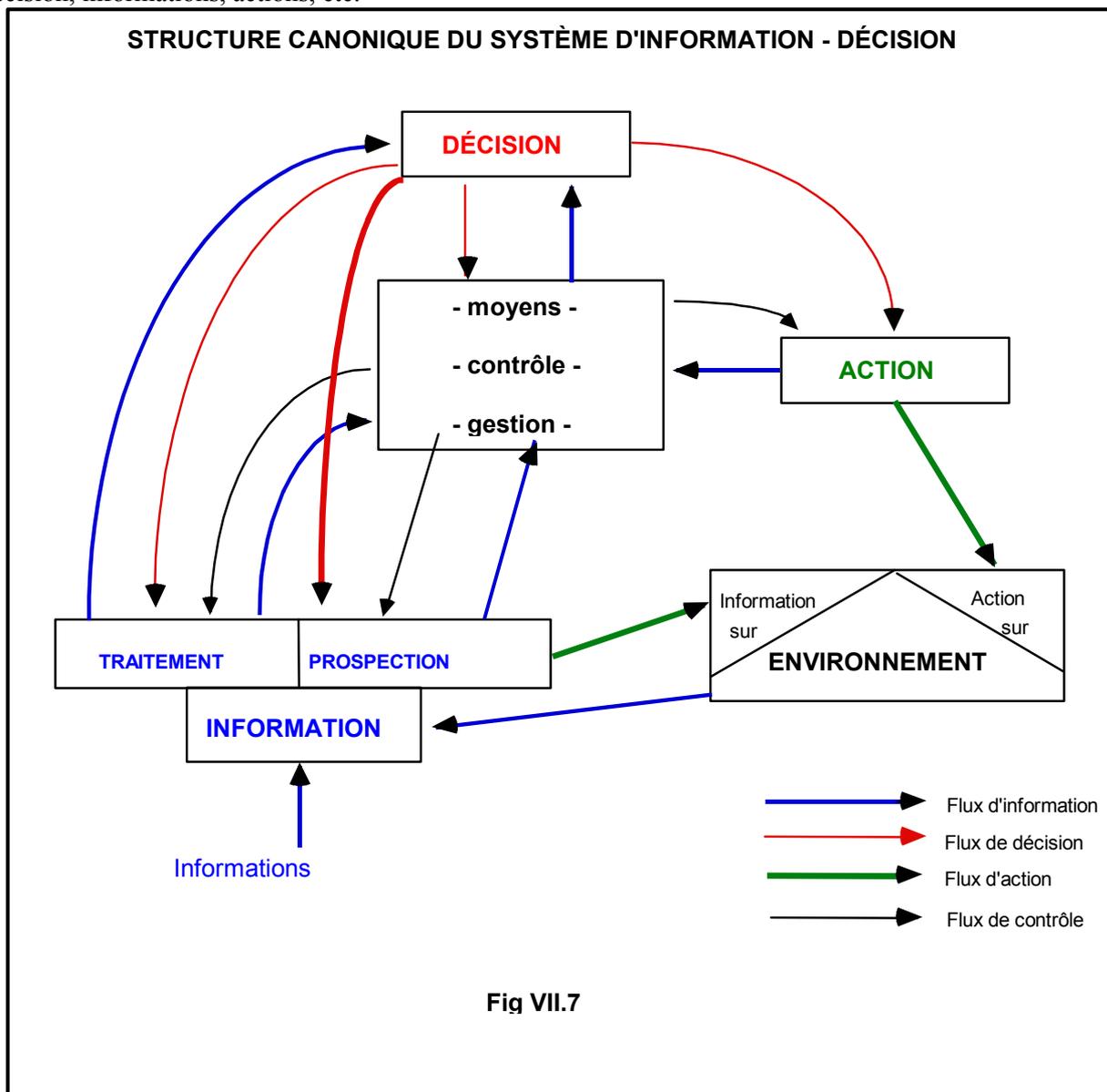


Fig.VII.6

La réunion des différentes fonctions et des relations décrites ci-dessus, confère à un système d'information une structure que nous appellerons canonique car elle semble bien caractériser la manière dont circule et est traitée l'information au sein de tout système de management. Celui-ci se compose, d'une manière générale :

- d'un environnement,
- d'informations, soit a priori, soit de rétroaction,
- de cinq fonctions dynamiques : de Décision, d'Action, d'Acquisition et de Traitement de l'Information, d'un ensemble de Moyens, Contrôle, Gestion.

Nous arrivons alors au schéma canonique suivant, que l'on peut appliquer à de nombreuses structures réelles au sein desquelles sont interconnectées, dans un enchevêtrement en général très complexe, prises de décision, informations, actions, etc.



Le schéma ci-dessus n'est encore que générique. Que devient-il lorsqu'on tente de l'appliquer à une réalité concrète ?

L'expérience montre qu'il ne faut surtout pas chercher à faire un modèle "hyper-réaliste", c'est-à-dire englobant tous les détails de la réalité. Ceci ne pourrait mener qu'à un schéma très complexe, difficile à gérer, à comprendre, à expliquer, à maintenir en vie. Il est possible, par contre, de modéliser séparément la structure du système "information - décision" (IDAR) de chaque niveau hiérarchique, sans tenter de modéliser, dans un premier temps, leurs influences mutuelles.

Les deux schémas suivants montrent la transcription du schéma IDAR canonique à deux niveaux hiérarchiques différents dans le domaine de l'exploration pétrolière :

- une direction de "l'EXPLORATION" (Fig. VII.8)
- le responsable d'un forage d'exploration (Fig. VII.9)

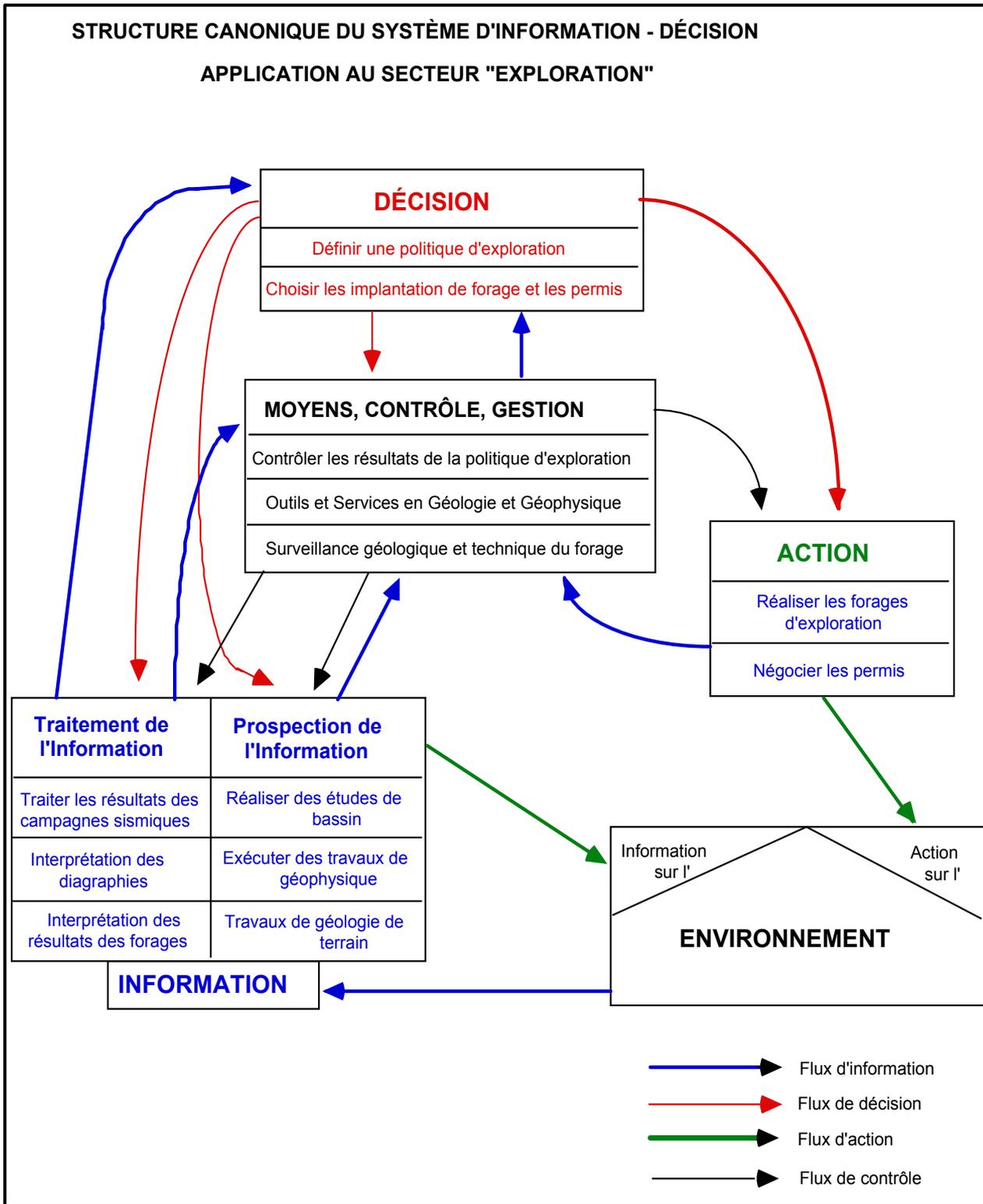


Fig. VII.8

**STRUCTURE CANONIQUE DU SYSTÈME D'INFORMATION - DÉCISION**  
**APPLICATION À UN FORAGE D'EXPLORATION**

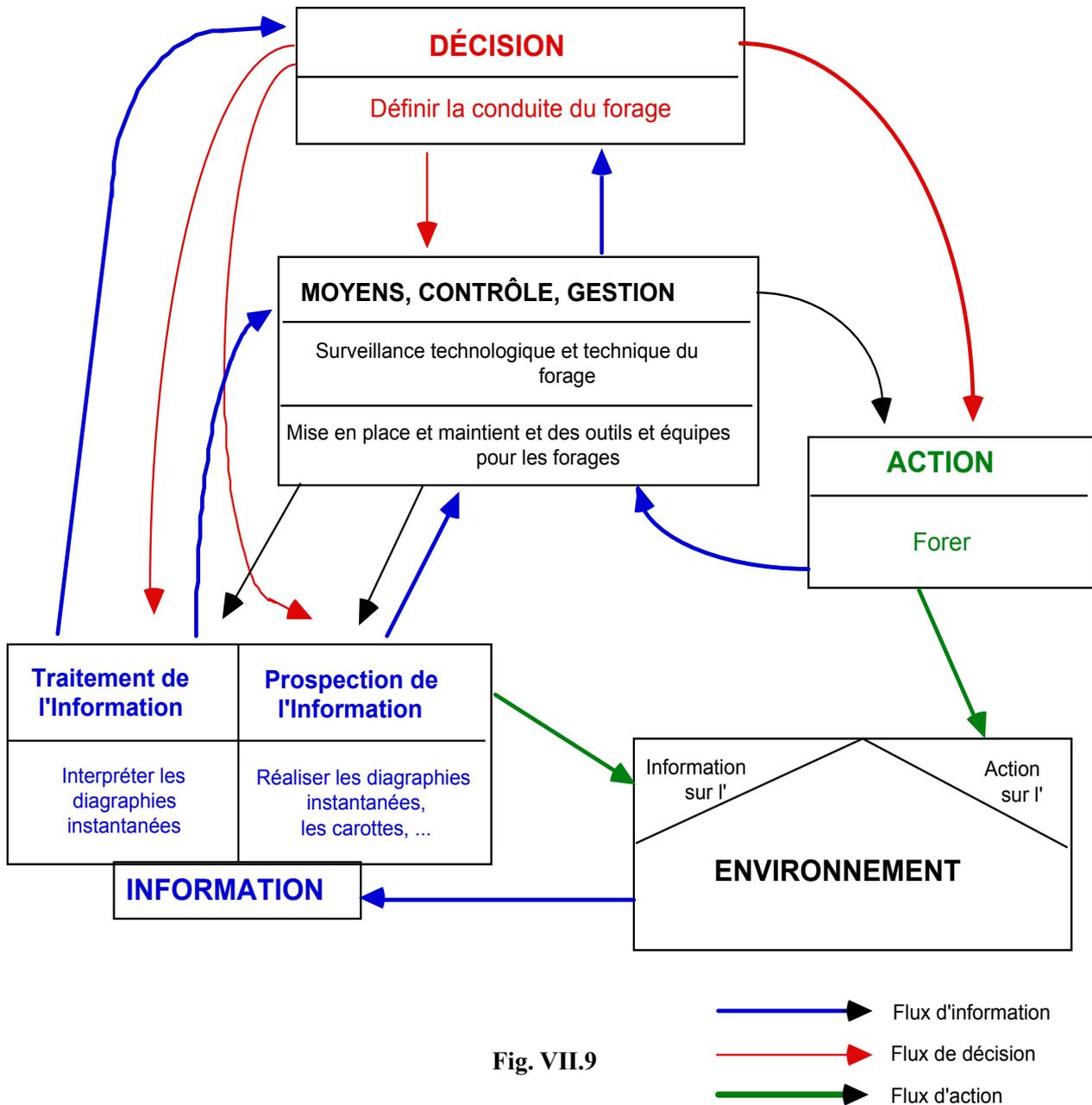


Fig. VII.9

**VIII – Une Application dans le domaine du Management de Projet**

**Gestion Evolutive d'un Projet Complexe**

Il existe de nombreuses techniques de gestion de projet, il en apparaît tous les jours de nouvelles. Celle que nous allons exposer a pour particularité de mettre en œuvre le temps et surtout de faire apparaître et de prendre en compte de nombreuses boucles de rétroaction tout au long de la vie et de la gestion d'un projet, boucles dont nous savons qu'elles constituent une des sources essentielles de la complexité des comportements dynamiques et en particulier de l'évolution d'un projet au cours de sa réalisation.

Cette approche a été appliquée pour la première fois, à notre connaissance, aux USA, aux début des années 70, par la société Pugh Roberts (progiciel PMMS), dans le cadre d'un conflit juridique entre la Marine américaine et une grande société ; elle est maintenant régulièrement utilisée dans les pays Anglo-Saxons, soit pour résoudre un litige, soit, de préférence, dès le début d'un projet et tout au long de celui-ci, de manière à éviter de tels litiges en fin de projet. Elle a donné lieu, dans les années 80, à quelques développements et applications en France (logiciel TOPSI développé au sein d'ELF-Aquitaine par Bertrand BRAUNSCHWEIG et Bernard PAPAZ).

Nous en expliquerons ci-dessous les principes et en montrerons une application simple dans le cadre d'un projet d'étude, développé par des étudiants de l'IMTL (Institut de Management des Transports et Logistique, Paris XII), d'un allongement d'une ligne de chemin de fer (TGV par exemple).

Il est utile de noter dès maintenant que la démarche de gestion de projet qui va être décrite ci-après, ne se situe pas en concurrence, mais plutôt en complémentarité d'autres méthodes de planification de projet.

## VIII – 1 – Principe

Comme pour le PERT, l'ancêtre sans doute des techniques de gestion, on commence par décomposer le projet en question en tâches à faire, nécessitant des moyens, du personnel, tâches dont la réalisation plus ou moins complète détermine le démarrage ou permet la poursuite d'autres travaux, et qui dépendent elles-mêmes de l'avancement d'autres tâches effectuées en amont ou en parallèle. On ne peut, par exemple, commencer la construction (maçonnerie) d'un bâtiment avant d'avoir réalisé les fondations, poser la plomberie ou l'électricité ou les éléments de télécommunication, avant d'avoir fait au moins une partie de la maçonnerie, etc.

Par ailleurs, il y a, dans chaque domaine technique, chaque secteur, qu'implique le projet (terrassment, construction, électricité, plomberie, chauffage, informatique, propulsion, etc.) des tâches de conception, de bureau d'étude, de construction, d'achats extérieurs de matériaux ou de sous-ensembles, le tout géré par une équipe de management ayant ses propres tâches évolutives de gestion du projet.

Pour revenir à l'exemple précédent, si l'on ne peut démarrer la construction avant d'avoir fait les fondations, on peut très bien commander presque tous les éléments nécessaires à la construction du bâtiment, avant que les fondations soient terminées, mais pas avant que les plans (bureau d'étude) soient complétés.

Le schéma ci-dessous résume, pour un quelconque des domaines techniques impliqués dans le projet, l'imbrication de ces tâches de natures différentes ; ce schéma se répèterait, imbriqué dans le processus complet du développement du projet, autant de fois qu'il y aurait de domaines techniques, de secteurs différents dans le cadre du projet.

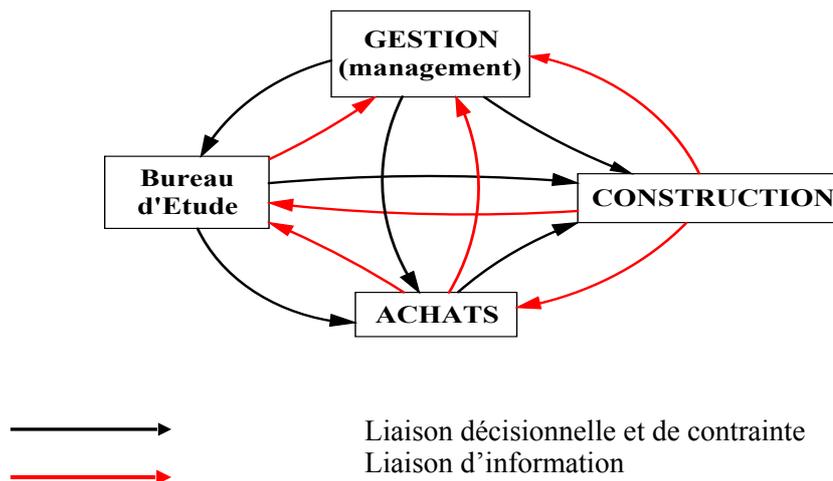


Fig.VIII.1.1

A l'intérieur de ces secteurs, les variables définissant l'évolution du projet sont souvent différentes des variables que l'on a l'habitude de prendre en compte et de suivre. Voici un exemple de variables, dans chacun des secteurs ci-dessus, dont nous aurons à suivre l'évolution car elle détermine l'avancement du projet.

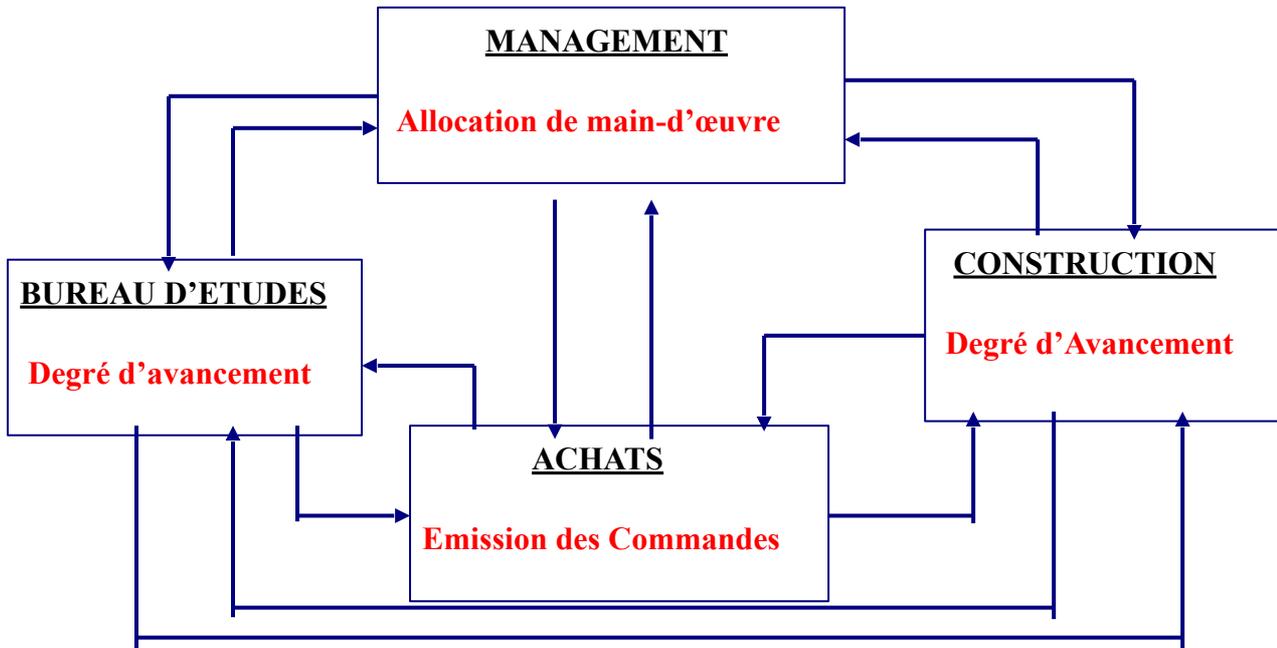


Fig. VIII.1.2

Pour tout projet important, il y aura donc, et ceci est vrai quelle que soit l'approche ou la méthode de gestion employée, un grand nombre de variables à suivre, l'interdépendance entre ces variables variant tout au long de l'avancement du projet.

La particularité de notre approche consiste en trois idées de base, on pourrait presque dire en trois « astuces », répétées autant de fois qu'il y a de variables caractéristiques de projet ou liées à son avancement. Naturellement, ces idées sont typiques du mode de réflexion « Dynamique des Systèmes ».

### VIII – 2 – Première idée de base

Pour chaque type de tâche, par exemple :

- la conception du projet,
- la réalisation de plans par le bureau d'étude,
- le lancement du processus d'achat des matériaux, pièces, équipements, puis la réalisation et le suivi de ces achats,
- la construction et l'assemblage des structures élémentaires du projet,
- le suivi et la gestion de tous ces processus,

il y a au début du projet un certain nombre de tâches à faire qui vont peu à peu se transformer en tâches faites. On voit déjà se dessiner la différentiation typiquement « DS » : variables d'accumulation ou variables de flux. Les tâches à faire (dans un secteur ou pour un type de tâche) ainsi que les tâches faites sont des variables d'accumulation, des niveaux dont l'un se vide pendant que l'autre se remplit à mesure de l'avancement du projet, le transfert d'un niveau à l'autre se faisant à travers un flux de réalisation de tâche.

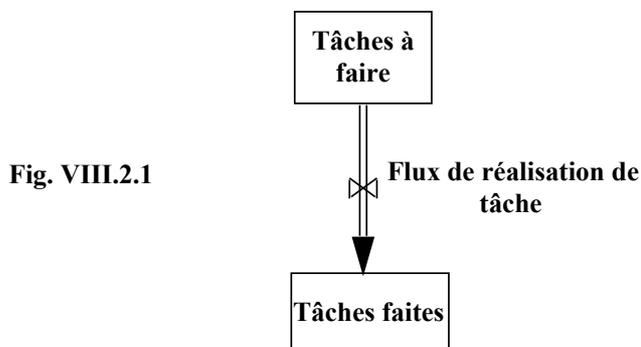
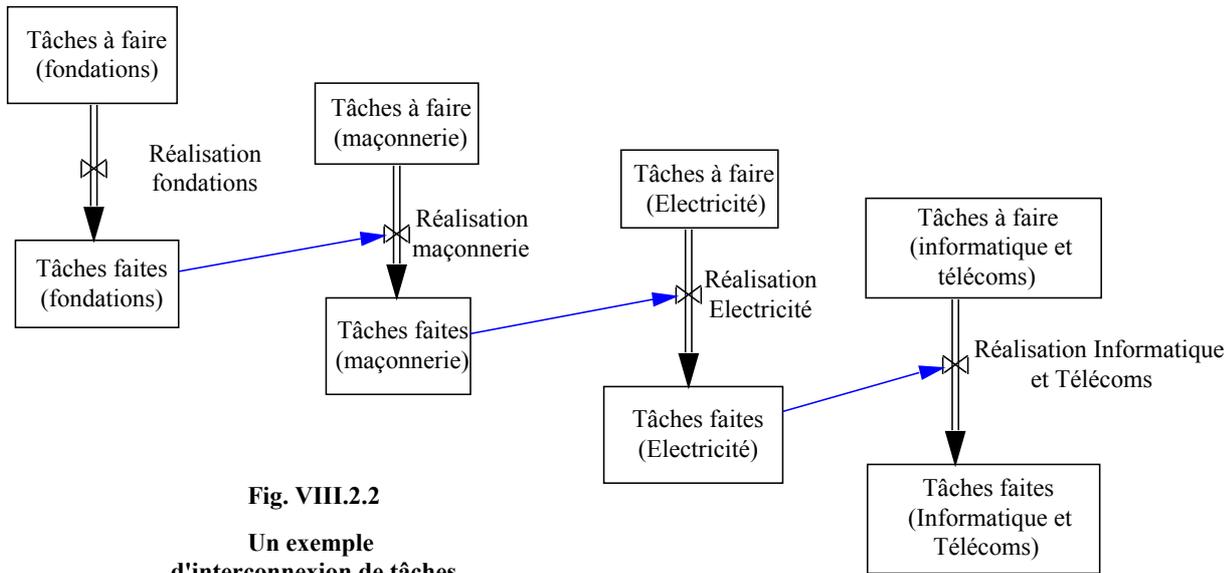


Fig. VIII.2.1

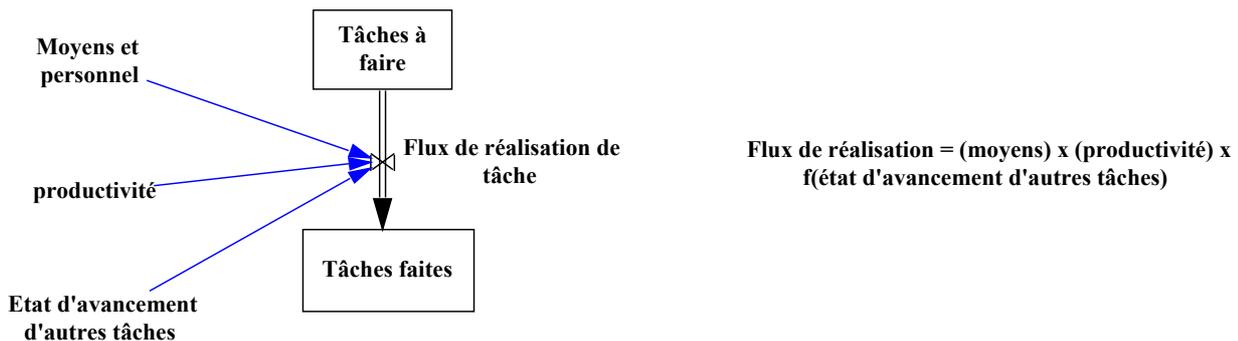
Ce schéma de principe sera répété autant de fois qu'il y aura de types de tâches (conception, définition, construction, achats, etc.) et de secteurs impliqués par le projet (maçonnerie, électricité, plomberie, etc.), avec, dans de nombreux cas, des relations d'influence entre ces schémas.



Mais de quoi dépend à chaque instant le flux de réalisation de chaque tâche ? D'une part des moyens mis en œuvre, en particulier du personnel qui effectue cette tâche, d'autre part de la productivité de ce même personnel et des moyens correspondants ;

Productivité = tâches réalisées / unité de temps

Il faudra aussi tenir compte de l'état d'avancement d'autres tâches, avancement qui souvent contraint le démarrage de la tâche en question (exemple déjà cité : on ne peut pas commencer la construction d'un bâtiment avant d'avoir fait les fondations).



Par ailleurs, la réalisation des tâches n'est pas toujours parfaite, elle dépend de la qualité du travail effectué. En fait, une partie des tâches considérées comme terminées comportent des erreurs non encore décelées. Plus tard, lorsqu'on se rendra compte de ces erreurs qui, si elles n'étaient pas corrigées, empêcheraient un développement correct du projet, la tâche en question devra être corrigée, peut-être même refaite entièrement. Ces tâches mal réalisées devront être remises dans le circuit pour une réfection partielle ou totale.

Comment modéliser en Dynamique des Systèmes, une telle décomposition des tâches, la reprise des erreurs, le retour dans le circuit ?

Le schéma suivant montre le principe de modélisation de la réalisation progressive des tâches. Il y a quatre variables d'accumulation, correspondant aux quatre états dans lesquels peut se trouver, à un moment ou à un autre, une tâche :

- tâche à faire (ou à refaire),
- tâche terminée et bien faite,
- tâche réalisée mais comportant des erreurs non encore mises à jour,

(notons que tant que ces erreurs n'auront pas été découvertes, la tâche correspondante sera considérée comme terminée, alors qu'en réalité elle devra être refaite),

- tâche dont les erreurs ont été mises à jour et qui attend d'être remise dans le circuit de réalisation pour correction de l'erreur.

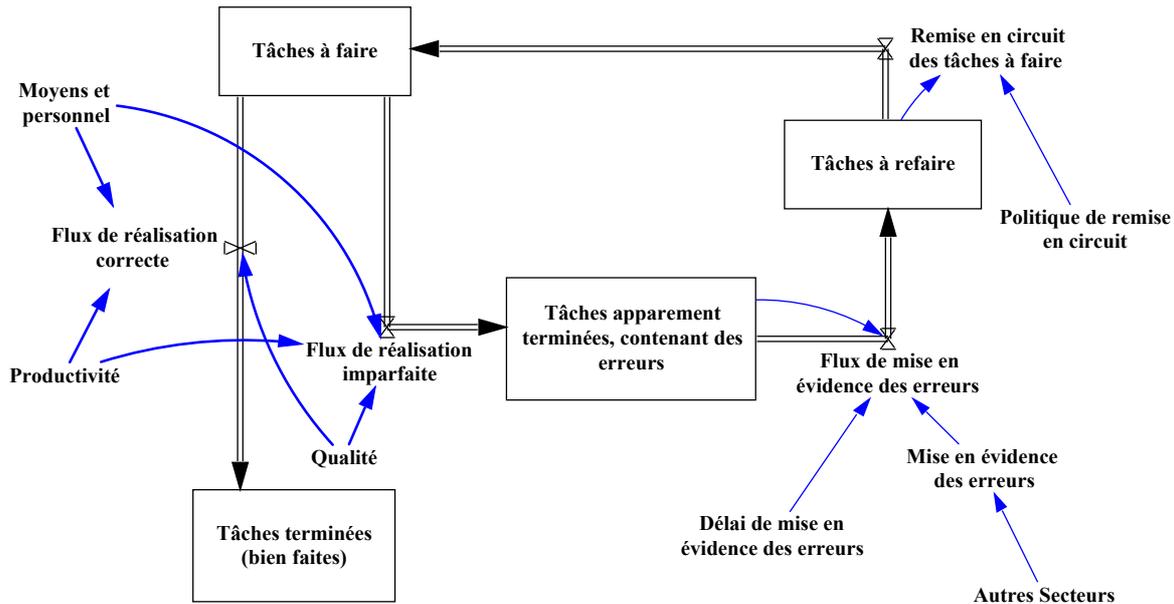


Fig. VIII.2.4

Ces quatre variables d'accumulation sont vidées ou remplies par des flux :

- flux de réalisation correcte = (moyens) x (productivité) x (qualité) x (contrainte de démarrage)
- flux de réalisation imparfaite = (moyens) x (productivité) x (1-qualité) x (contrainte de démarrage)
- flux de mise en évidence des erreurs = (tâches) x (mise en évidence des erreurs après délai) x

(nombre de tâches contenant des erreurs)

(le dernier terme de cette relation signifie que le flux de mise en évidence des erreurs est proportionnel au nombre de tâches comportant de telles erreurs)

- flux de remise en circuit (pour correction des erreurs) = f(tâches à refaire)

(ce flux peut dépendre de la disponibilité des équipes, de considérations politiques liées à la mise en évidence de retards probables, etc.).

Nous avons ainsi mis en évidence une première boucle, physique, d'évolution des tâches au sein du processus de réalisation des tâches. Cette boucle, qui manifestement allonge les délais et augmente les coûts (directs et indirects) n'est pas toujours prise en compte lors des évaluations initiales d'un projet, ce qui explique certaines sous-évaluations constatées de coûts et de délais.

Notons par ailleurs que le schéma bouclé de la Figure VIII.2.4 se retrouve souvent dans les analyses faisant appel à la Dynamique des Systèmes, et ceci dans des domaines très divers. Par exemple, si l'on veut décrire le trafic automobile dans une zone (ville, arrondissement, secteur), on arrivera très vite à un schéma qui ressemblera à ce qui suit, et qui n'est, naturellement, que le début d'un modèle complexe :

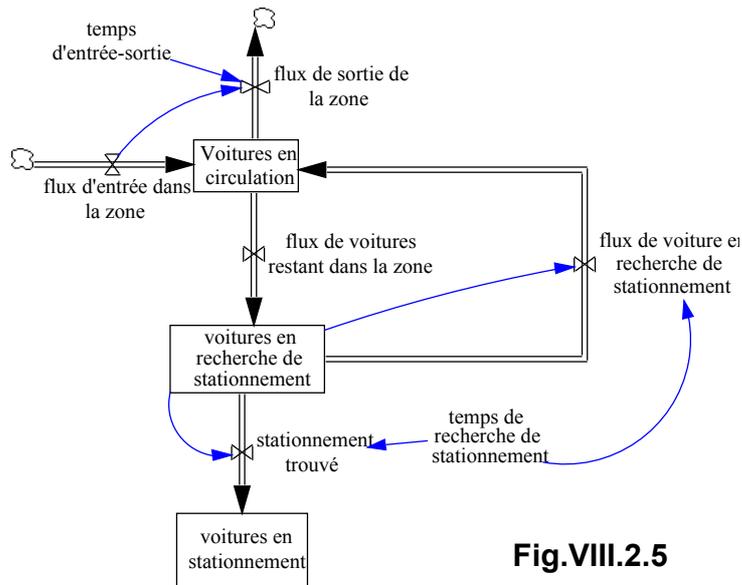
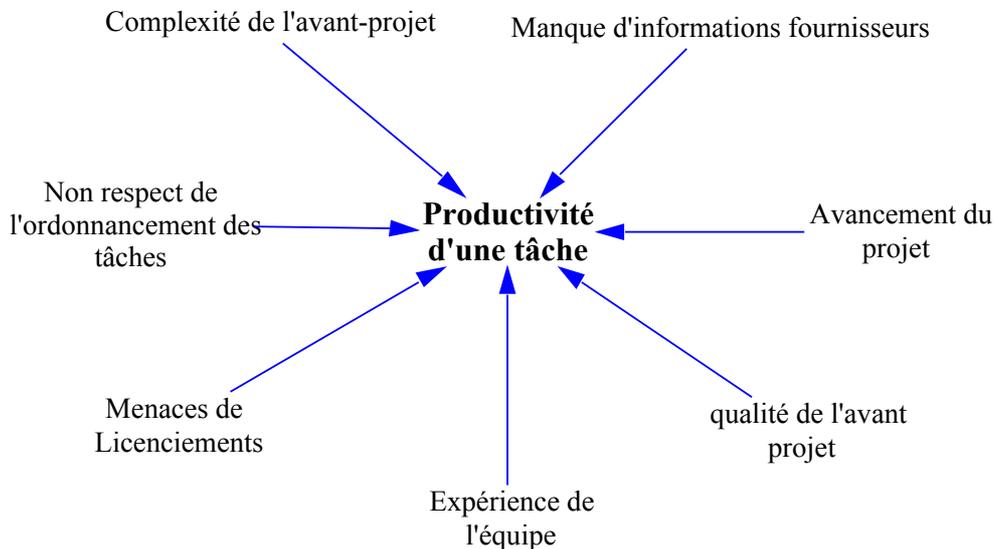


Fig.VIII.2.5

### VIII – 3 – Deuxième idée de base

Les divers flux de réalisation des tâches sont fonction, rappelons le, des moyens mis en œuvre et de la productivité de ces moyens. Or ces deux éléments ne sont pas fixes dans le temps, ils peuvent varier à mesure de l'évolution du projet. La productivité, par exemple, sera influencée par divers facteurs, eux-mêmes potentiellement évolutifs et dépendant évidemment du type de tâche en question ainsi que du projet en cours de développement. Nous ne mettrons en exergue et ne discuterons que quelques-uns de ces facteurs, dont l'influence peut a priori s'appliquer à tous les projets et à la plupart des tâches.



**Fig. VIII.3.1 : Quelques variables pouvant influencer la Productivité d'une tâche**

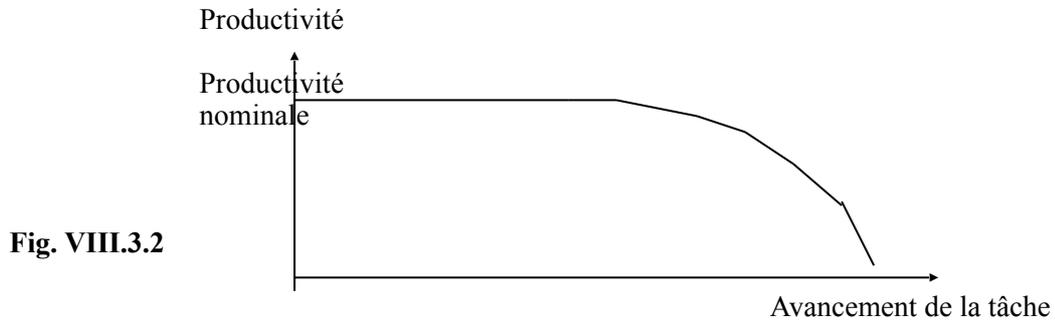
Essayons d'analyser quelques-uns de ces relations d'influence qui, si elles sont le plus souvent de nature essentiellement qualitative, n'en ont pas moins une influence considérable sur l'évolution d'un projet.

#### VIII – 3 – 1 : Avancement du projet

Bien que cette influence soit parfois contestée, il est fréquent de constater que la productivité des moyens mis en œuvre – surtout des moyens humains – n'est pas la même au début et à la fin de la

réalisation d'une tâche, au commencement ou vers la fin d'un projet. En fin de parcours, lorsqu'on pense qu'une tâche est terminée, l'effort, la tension appliquée à la réalisation ou à la modification de cette tâche diminue, le personnel est souvent affecté à d'autres travaux et un retour en arrière, par exemple pour corriger des erreurs passées, se fait avec une productivité en général inférieure à la productivité initiale, considérée en général comme nominale...et intangible.

Nous représenterons cette influence graphiquement :

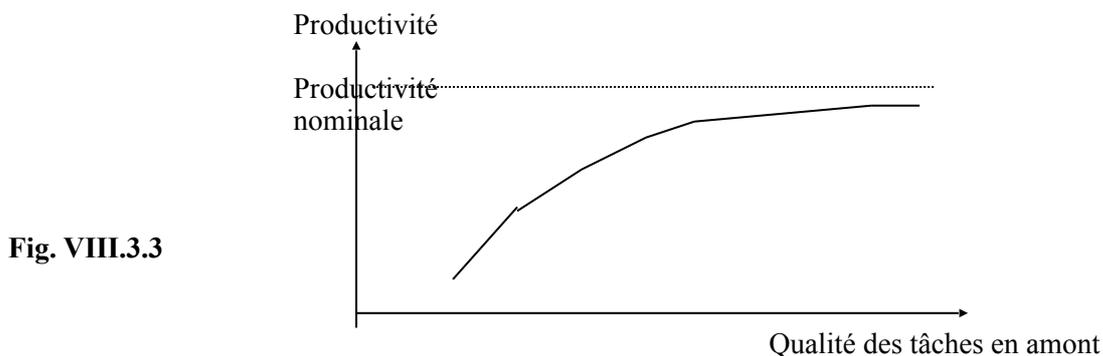


Ceci implique qu'un retour pour correction d'erreur se fera souvent avec une productivité moindre qu'en début de réalisation de la tâche en question, ce qui n'est que rarement pris en compte dans les évaluations et planifications de projet.

La courbe ci-dessus dépend bien évidemment de la tâche dont nous voulons analyser l'évolution possible, et l'évaluation de cette relation d'influence ne doit pas être bâclée. Ceci est d'ailleurs vrai pour toutes les relations d'influence que nous examinerons par la suite, ou dont nous suggérerons l'existence sans nous y attarder. La détermination de ces courbes nécessite la participation active et réfléchie soit du chef de projet, soit d'un responsable de planification, en tout cas d'un ou plutôt de plusieurs experts du domaine considéré. Notons toutefois que la vérification de la cohérence de ces nombreuses courbes - aussi nombreuses qu'il y a de tâches à effectuer pour réaliser le projet - peut et doit se faire à la fois a priori (avis d'expert) et a posteriori, c'est à dire en vérifiant la crédibilité du modèle à l'aide de multiples simulations, en se plaçant en particulier dans des conditions extrêmes de fonctionnement. Souvent, ce sont ces simulations qui permettent de mettre en évidence, donc de corriger des erreurs de conception, de mise en œuvre ou de paramétrage.

### VIII – 3 – 2 : Qualité de l'Avant-Projet

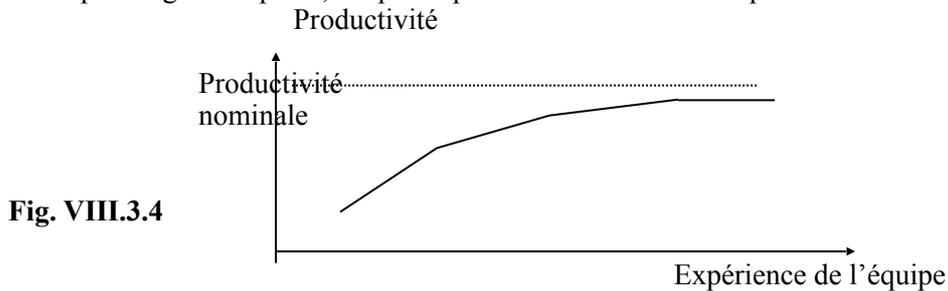
La productivité dont dépend la réalisation d'un travail dépend de la qualité avec laquelle a été réalisée la ou les tâches situées en amont et dont dépend le travail en cours. Un avant-projet mal fait, des approvisionnements incomplets ou inadéquats, ont toutes les chances de ralentir le travail en cours, donc de baisser la productivité correspondante.



Ici aussi, cette courbe dépend des tâches auxquelles elle s'applique, et devra être individualisée selon les tâches.

### VIII – 3 – 3 : Expérience de l'Equipe

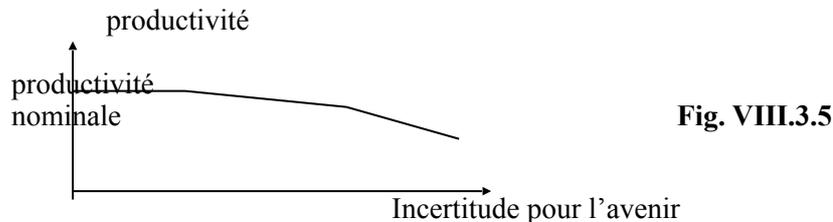
Il est facile d'imaginer que la productivité dont dépend la réalisation d'une tâche, sera fonction de l'expérience de l'équipe responsable de cette tâche. A priori, on pourrait penser que cette expérience reste constante tout au long de la tâche. En fait, le personnel peut changer, évoluer, de nouvelles personnes, moins expérimentées, peuvent être affectées à l'équipe, soit pour la renforcer en cas de retard sur le planning, soit tout simplement pour remplacer des partants. En général, ce personnel nouveau a moins d'expérience que les gens en place, ce qui risque fort de faire baisser la productivité de l'équipe.



Nous reportons en annexe de ce chapitre une analyse de l'évolution de l'expérience d'une équipe, et des problèmes d'embauche nécessités par un surcroît de travail.

### VIII – 3 – 4 : Licenciements

Une atmosphère inquiète, l'incertitude quant à l'avenir du projet ou de la société, ne sont pas propices à un travail vite et bien fait.

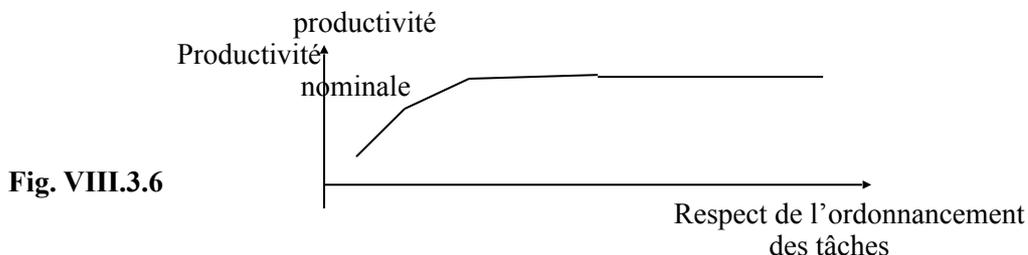


De telles menaces de licenciements peuvent apparaître, en particulier, vers la fin d'un projet, alors même que les révisions, les reprises et corrections d'erreurs peuvent être à leur apogée et nécessiter un surcroît de travail sur des tâches déjà anciennes.

### VIII – 3 – 5 : non-respect de l'ordonnancement des tâches

Ce phénomène apparaît souvent dès lors que le projet a des difficultés, prend du retard, présente des surcoûts potentiels. Il arrive qu'une Direction énervée, affolée, intervienne malencontreusement dans le planning du projet, modifiant les séquences de tâches, chamboulant les équipes, etc.

De telles interventions, faites avec l'intention évidente de remettre le projet dans le bon chemin, ont presque toujours une influence négative sur la productivité réelle, bien que ceci ne soit presque jamais – pour des raisons politiques – pris en compte a priori, au moment de l'intervention de la Direction.



Nous laisserons au lecteur intéressé le soin d'imaginer les influences possibles d'autres facteurs (complexité de l'avant-projet, manque d'information des fournisseurs, et nombre d'autres influences dépendant du type et de la nature du projet) sur la productivité, sachant que les variables pouvant influencer la productivité risquent de différer selon les types de tâche et les projets. Mais surtout, si l'on revient à la Fig. VIII.3.1, on constate que les 7 variables listées, pouvant influencer sur la productivité, sont elles-mêmes non seulement évolutives dans le temps, mais encore dépendantes de l'évolution du projet, donc des tâches qu'elles-mêmes influencent. Nous avons là non pas une, mais plusieurs boucles de rétroaction, chacune





```

embauche_jeunes = IF condition_embauche_surcroît_tâches>0 THEN ROUND(embauche_théorique) ELSE 0
OUTFLOWS:
jeunes_formés=IF(jeunes/temps_de_formation-INT(jeunes/temps_de_formation))>0THEN INT(jeunes/
temps_de_formation)+1 ELSE INT(jeunes/temps_de_formation)
départs_jeunes = jeunes*taux_départ_jeunes
condition_embauche_surcroît_tâches = MAX(0,personnel_qualifié_nécessaire-anciens)
délai_embauche = 3
e m b a u c h e _ t h é o r i q u e =
SMTH3(départs_anciens+départs_jeunes+condition_embauche_surcroît_tâches,délai_embauche)
personnel_qualifié_nécessaire = réalisation_désirée/productivité_anciens
productivité_anciens = 1
productivité_jeunes = .4
Productivité_moyenne = réalisation_travaux/(anciens+jeunes)
réalisation_désirée = 20+STEP(5,6)
réalisation_travaux = (anciens*productivité_anciens)+(jeunes*productivité_jeunes)
taux_départ_anciens = 0
taux_départ_jeunes = .2/12
temps_de_formation = 6
    
```

Voici, avec les données choisies, le résultat de la simulation :

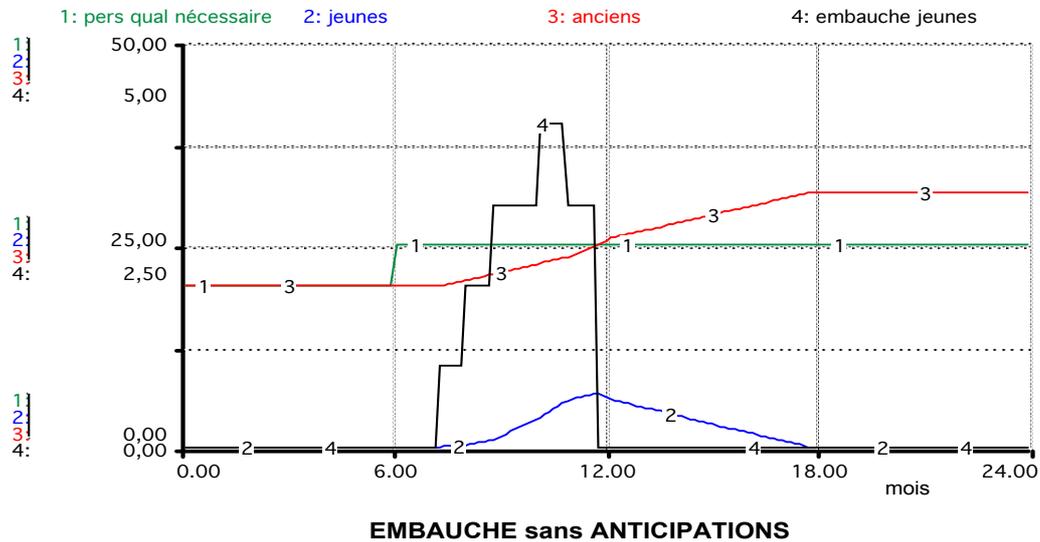
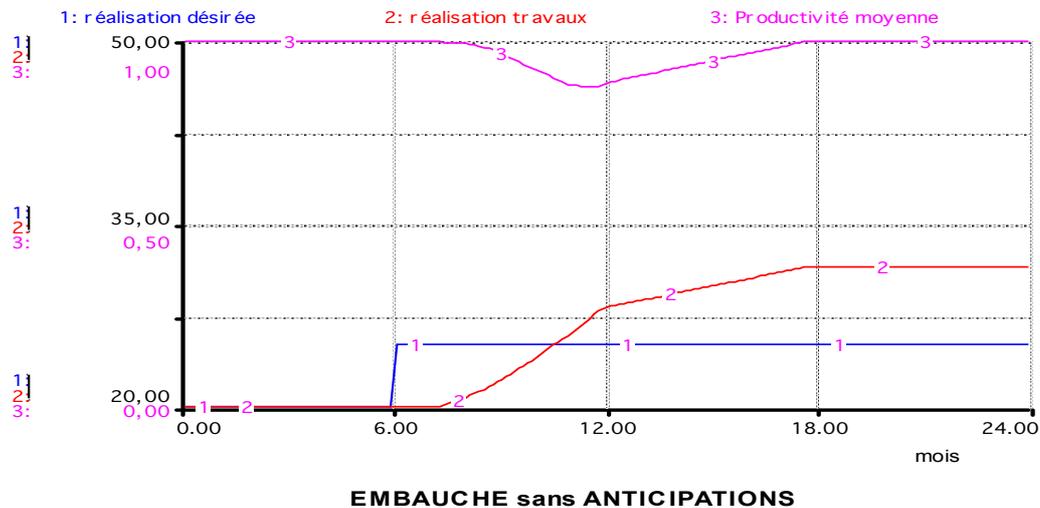


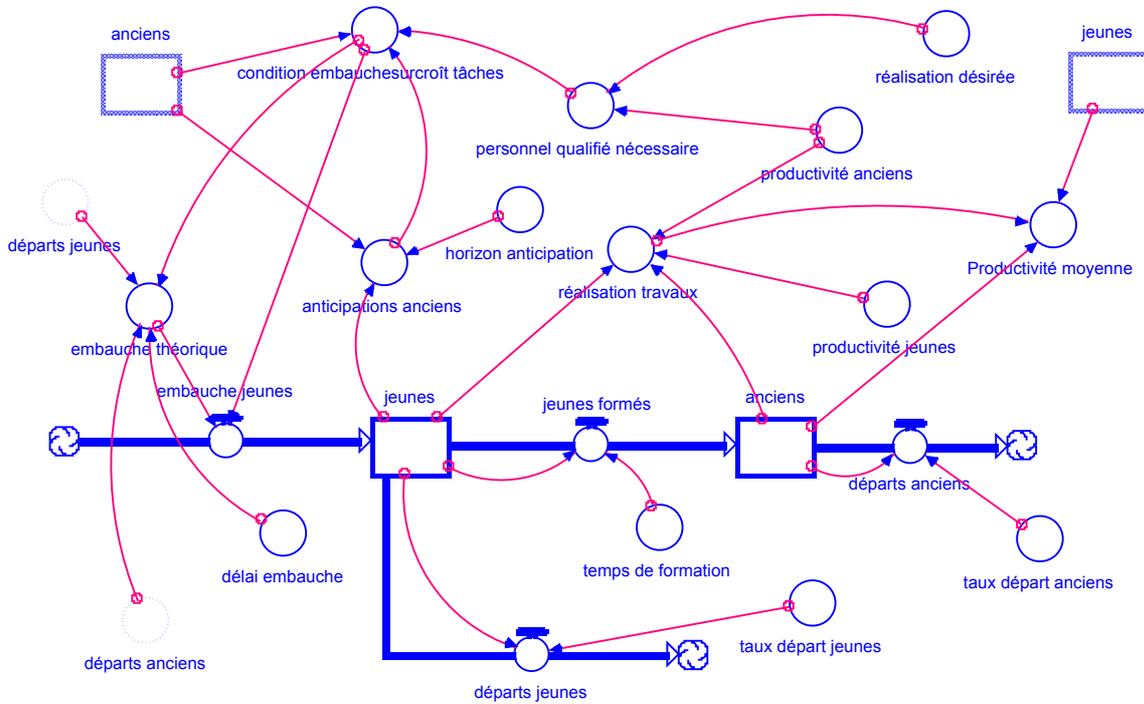
Fig. VIII.3.9 : Evolution des effectifs



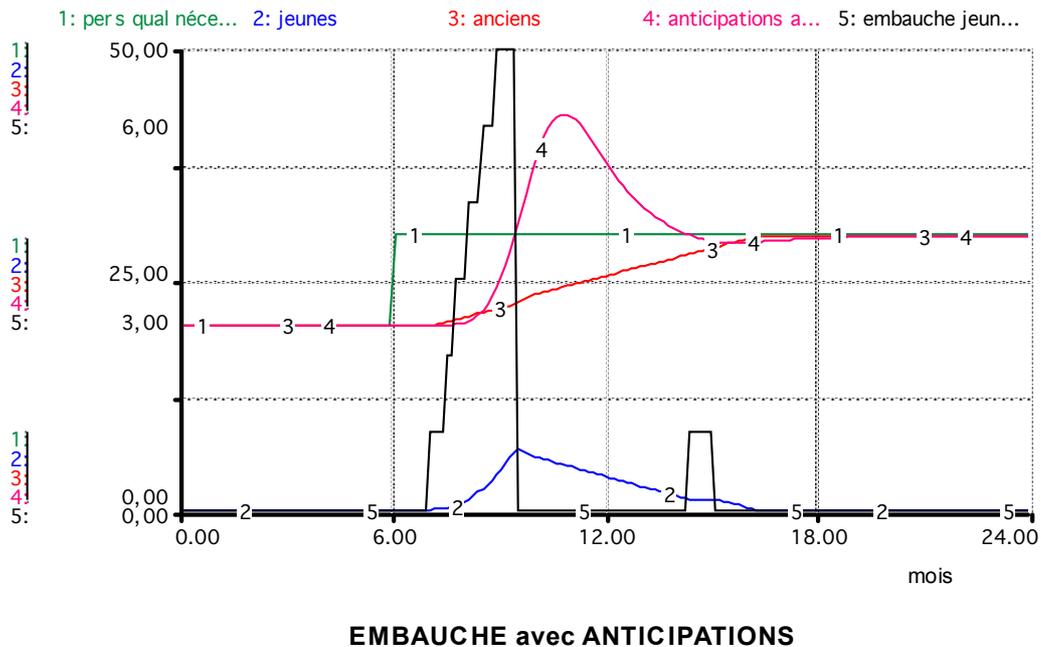
**Fig. VIII.3.10 : Réalisation des tâches demandées et Evolution de la Productivité**

On voit que cette politique amène une embauche massive qui, si elle est relativement efficace en ce qui concerne la réalisation des tâches (la courbe 2 : travaux réalisés, atteint et dépasse la courbe 1 : travaux à réaliser, au bout de moins de 6 mois), risque de créer à terme des problèmes de surnombre de spécialistes.

On peut se demander alors, s'il n'y a pas d'autres politiques possibles d'embauche. Le schéma suivant et les graphiques correspondants, montrent le résultat d'une prise en compte, au niveau de la politique d'embauche, d'une anticipation de l'évolution du nombre de spécialistes (une des politiques possibles, souvent appliquée d'ailleurs).



**Fig. VIII.3.11 : Embauche tenant compte du nombre anticipé de spécialistes**



**Fig. VIII.3.12 : Evolution des effectifs**

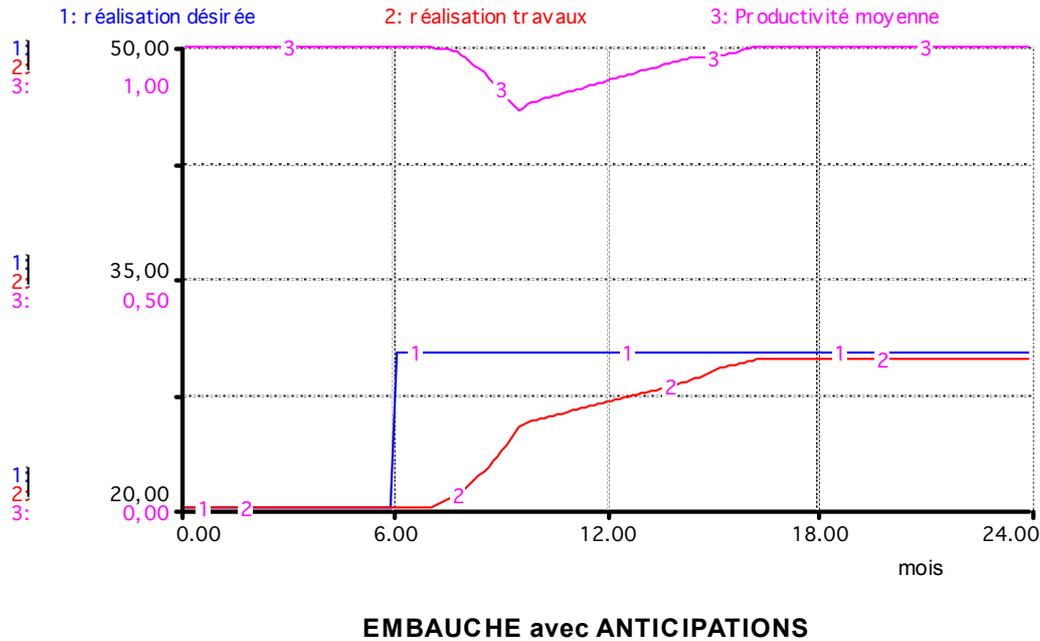


Fig. VIII.3.13 : Réalisation des tâches demandées et Evolution de la Productivité

Avec cette politique d'anticipation, on n'embauche pas trop de personnel, mais on rattrape plus lentement (15 mois) le surcroît de travail. D'autres tests de politique d'embauche pourront être imaginés, proposés, essayés. Une session d'essais simulés coûte toujours moins cher que la réalité et permet souvent d'éviter des erreurs tragiques ou pour le moins regrettables.

En particulier, nous avons jusqu'à présent considéré que seule la productivité des spécialistes (soit une productivité maximale, toutes choses égales par ailleurs) était à prendre en compte lorsqu'on déterminait l'embauche nécessaire pour satisfaire un surcroît de travail. En réalité, si les « jeunes » participent au travail, avec une productivité valant 40% de celle des anciens, la productivité de l'ensemble de l'équipe sera temporairement réduite (voir les courbes précédentes de productivité moyenne). Si l'on tient compte de cette baisse de productivité, il y aura un surcroît temporaire d'embauche, que le modèle pourra aider à optimiser, de manière à éviter à terme un surplus de personnel.

#### VIII – 4 – Troisième Idée de Base

Ce qui vient d'être décrit concernant la productivité, peut être repris et appliqué à la variable « qualité » qui, nous l'avons vu précédemment, partage le flux des tâches en « tâches bien faites » et en « tâches mal faites », sachant que ces dernières ne sont pas immédiatement reconnues comme telles (une tâche dont les erreurs sont immédiatement reconnues et corrigées, devient une « tâche bien faite », seule peut-être, la productivité s'en ressent).

Les variables influençant la qualité peuvent être les mêmes que celles influençant la production, ou elles peuvent être différentes, cela dépendra du projet et de la nature de la tâche en question. Mais les fonctions d'influence, représentées par des graphes, ne seront que rarement identiques pour la productivité et la qualité.

Par exemple, si l'on considère l'influence des licenciements, il est probable, il est surtout souhaitable, que ceux-ci influenceront plus la productivité que la qualité du travail.

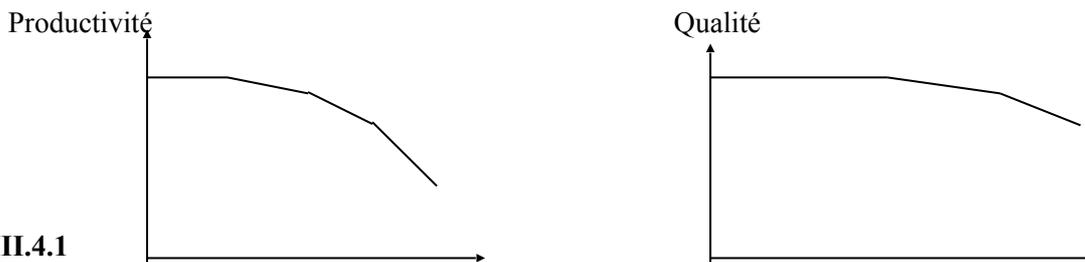


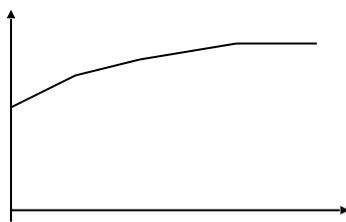
Fig. VIII.4.1

## Licenciements

## Licenciements

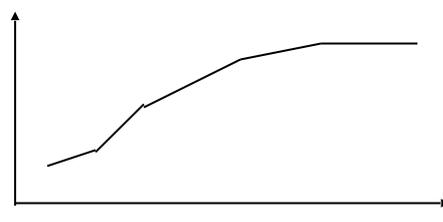
Par contre, un non-respect de l'ordonnancement des tâches peut au contraire avoir un effet plus néfaste sur la qualité que sur la productivité

Productivité



non-respect de l'ordonnancement

Qualité



non-respect de l'ordonnancement

Fig. VIII.4.2

Par ailleurs, certaines causes peuvent influencer sur la qualité et rester sans effet sur la productivité, ou vice-versa.

Pour la qualité comme pour la productivité, on constate que les variables pouvant influencer sur la qualité sont à la fois évolutives dans le temps, et dépendantes de l'évolution et de l'avancement du projet, de ses différentes tâches, donc à la fois des productivités et des qualités correspondantes. Le nombre de boucles de rétroaction va croître très rapidement, et ces boucles risquent, selon les circonstances, le moment, l'état du projet, de fortement influencer sur le développement de celui-ci.

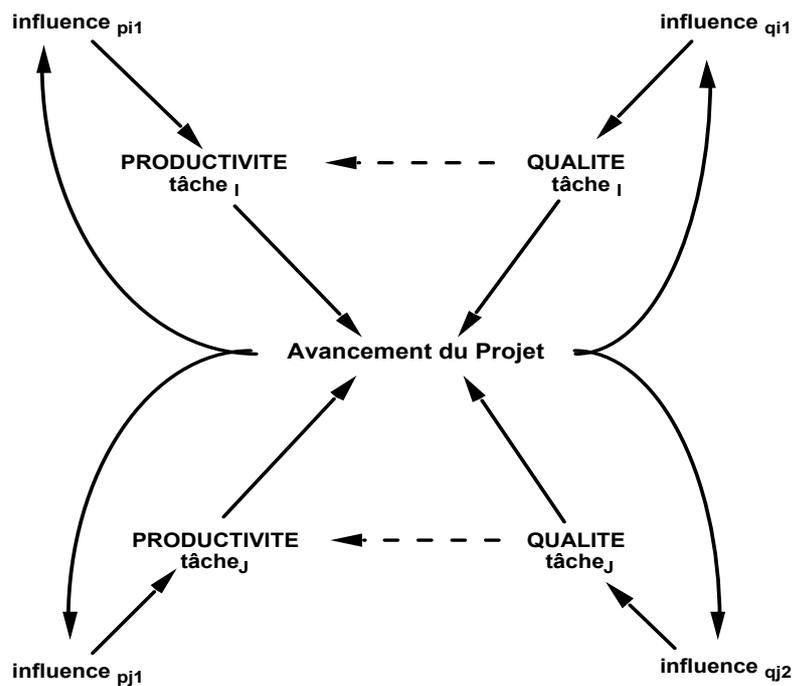


Fig. VIII.4.3

## VIII – 5 – Un exemple d'application : la construction d'un tronçon de ligne de TGV

L'exemple choisi a été mis au point par un petit groupe d'étudiants de l'IMTL (Institut Management Transport Logistique, Université Paris XII), comme application des principes décrits ci-dessus.

Le projet consiste en la construction d'un tronçon d'une ligne T.G.V. d'une longueur de 500 kilomètres. Le point de départ du modèle se situe à l'instant où le chantier est prêt à démarrer, on ne s'intéresse donc qu'à la partie « B.T.P. » du projet, en excluant aussi le volet financier du chantier.

Naturellement, c'est là un exemple très simple, et son traitement sera simpliste, puisqu'il s'agit seulement de donner une idée de la façon dont la démarche décrite ci-dessus peut être mise en pratique.

La structure du modèle

Les secteurs : Trois secteurs ont été choisis, c'est-à-dire 3 séries de tâches à faire :

- Terrassement
- Pose des rails
- Electrification des voies

L'évolution des travaux dans chacun de ces secteurs correspond à une même structure de modélisation, telle qu'elle a été décrite dans la Figure VIII.2.4., comportant des tâches à faire, des tâches faites dont certaines sont bien faites et d'autres nécessiteront ultérieurement une reprise de travail (tâches mal faites, non reconnues comme telles au premier abord, puis reconnues). Ce sont là des variables d'accumulation, remplies ou vidées par des flux représentant le travail fait à chaque unité de temps, mais fait bien, ou mal, et dans ce dernier cas, avec un délai de reconnaissance des erreurs.

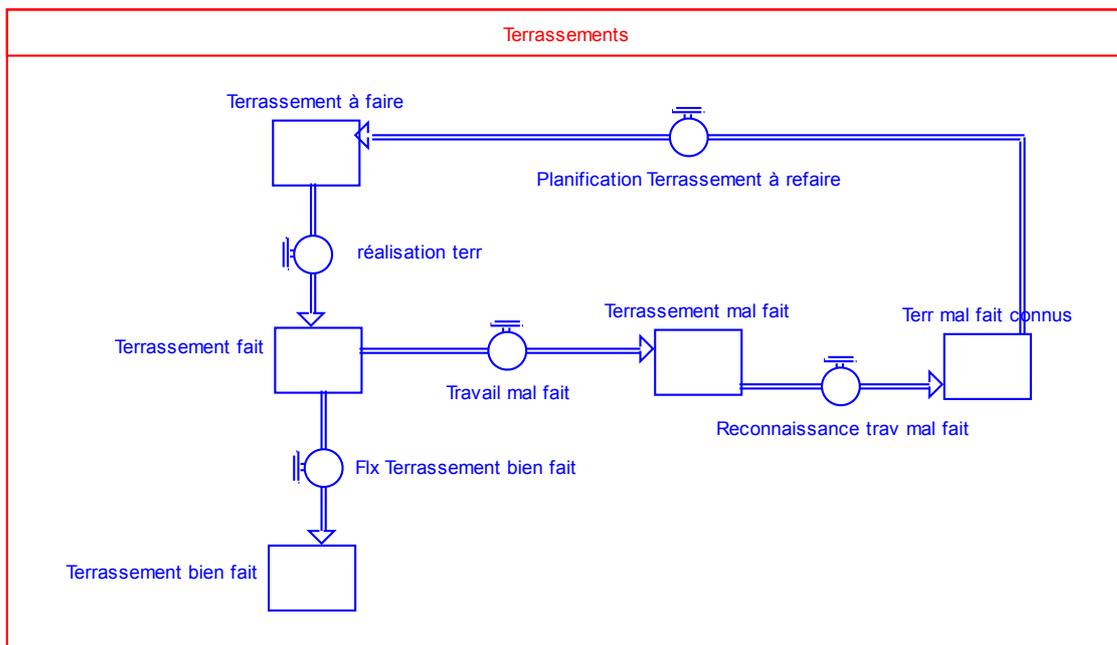


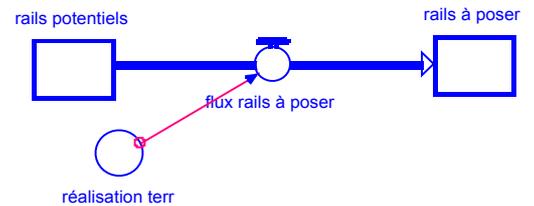
Fig. VIII.5.1

Naturellement, le schéma ci-dessus se complique dès lors qu'on ajoute aux variables d'accumulation (variables d'état) et aux flux, des relations et des variables d'information, de décision, d'influence. Dans le cas présent, on sait déjà qu'on aura au moins les variables de productivité, de qualité et de personnel affecté qui influenceront sur les flux de réalisation des tâches :



D'une part, des erreurs dans le travail de pose des rails peuvent n'avoir de conséquence (reprise de tâche) que dans le secteur rails, ou bien elles peuvent être dues et faire apparaître des erreurs commises en amont, c'est-à-dire dans le secteur terrassement, et nécessiter alors une reprise de tâche à la fois dans le secteur rails et le secteur terrassement (ces tâches sont appelées dans le modèle : Rails mal posés connus T).

D'autre part, on ne peut commencer à poser des rails que lorsqu'une partie au moins des terrassements est faite (bien ou mal, au début on ne le sait pas). On sait dès le début qu'il y aura une certaine longueur de rails à poser (par exemple 500 km) mais c'est une grandeur potentielle, une variable d'accumulation qui ne peut commencer à se vider que lorsque les terrassements nécessaires à la pose correspondante des rails est réalisée.



D'où le schéma du secteur rails :

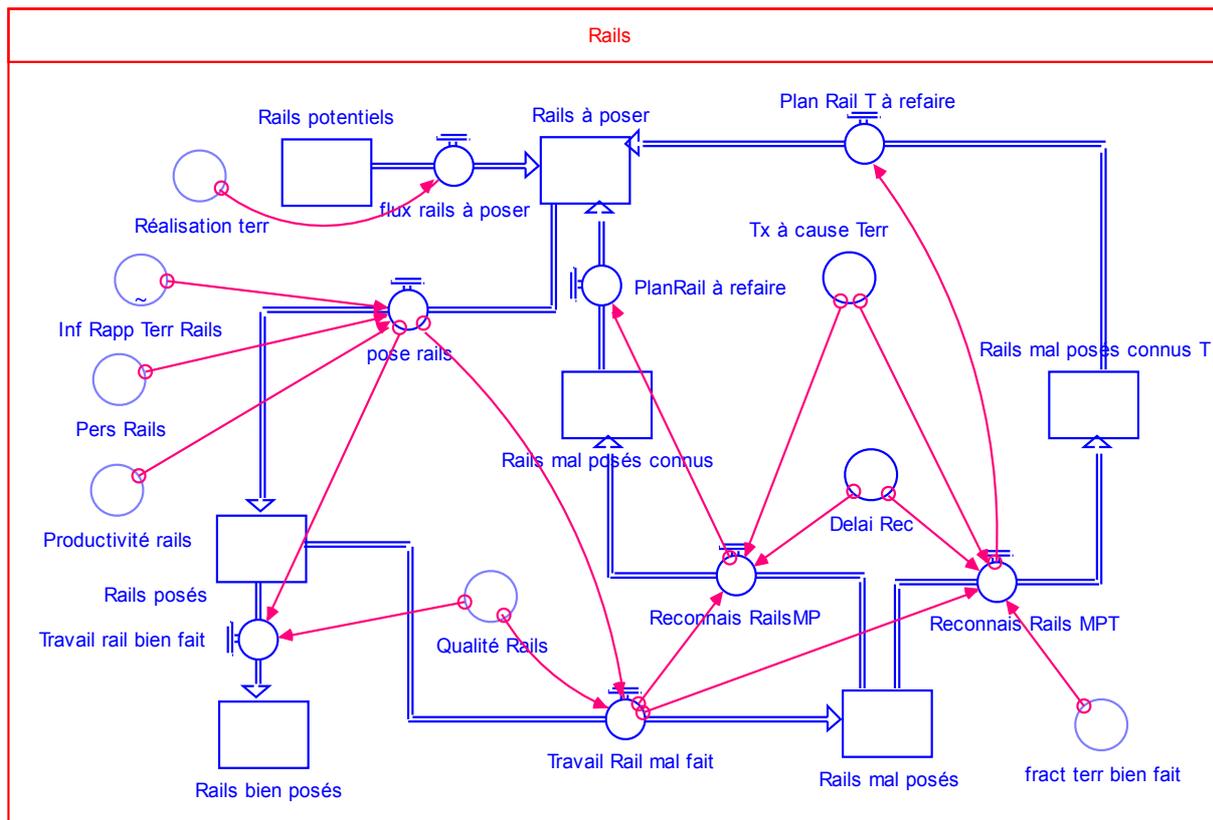
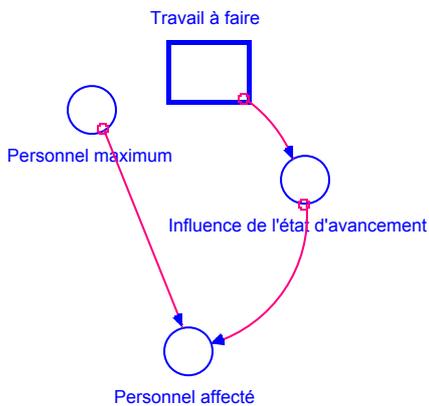


Fig. VIII.5.4

Il y aura aussi un schéma semblable pour le secteur décrivant la pose des caténaires, avec en plus la possibilité d'erreurs dues à de mauvais terrassements ou à des rails mal posés (nous laisserons au lecteur intéressé le soin d'imaginer et de représenter ce dernier secteur).

Il reste aussi à analyser les évolutions possibles des moyens (personnel), de la productivité et de la qualité. Dans cet exemple simple, nous considérerons que chacune de ces variables ne dépend que d'un seul facteur interne au problème, c'est-à-dire au modèle. Dans la réalité, nous l'avons vu, les causes de variation de ces paramètres peuvent être très nombreuses.

**Le personnel :**



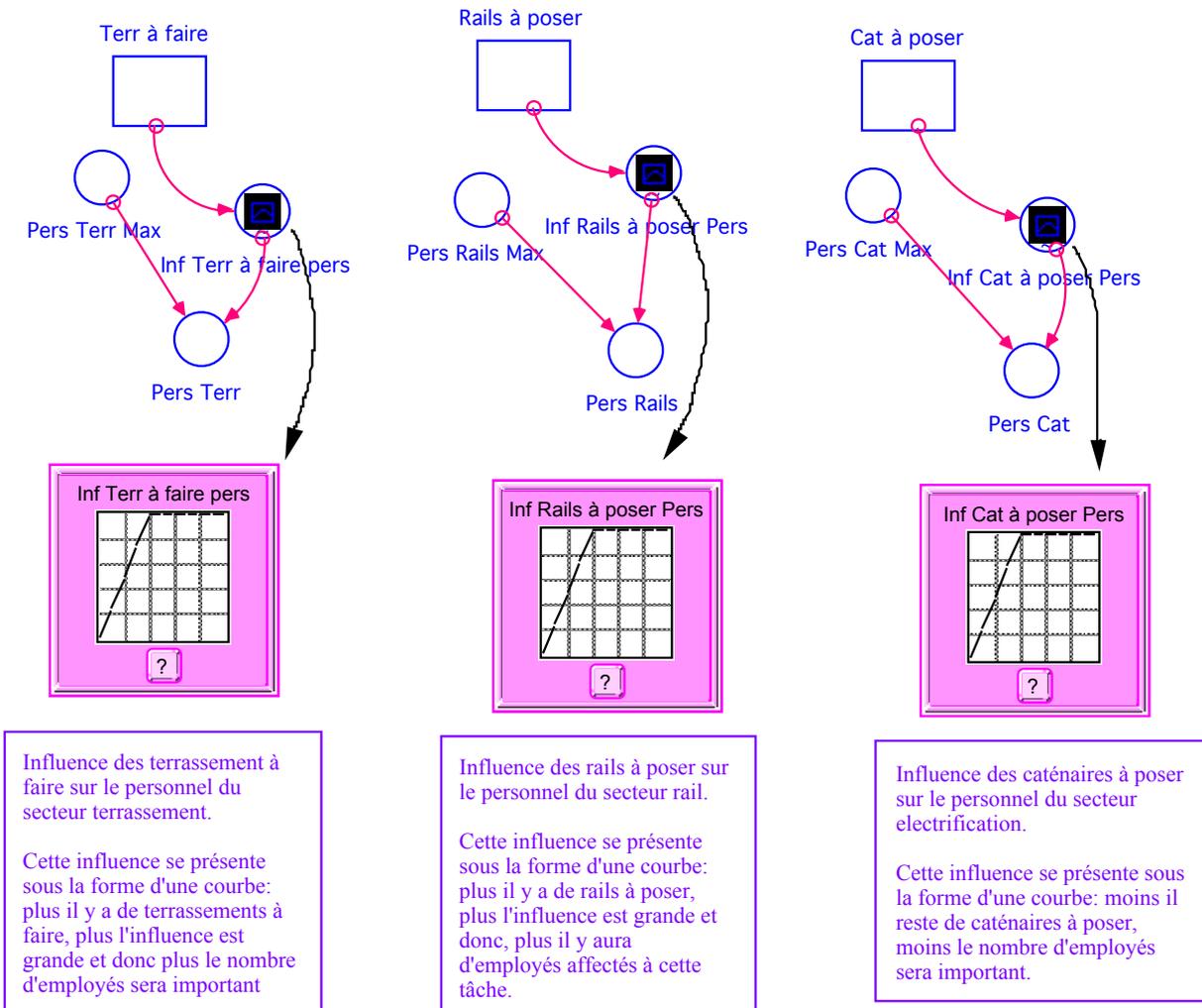
PERSONNEL MAXIMUM représente le nombre maximum d'employés que les responsables du chantier ont décidé d'embaucher dans chaque secteur. Ce nombre pourra varier de 0 à 100, au gré de l'utilisateur.

L'INFLUENCE DE L'ETAT D'AVANCEMENT se présente sous forme de courbes : plus le chantier est avancé, moins on emploiera du personnel sur les tâches restantes.

Le PERSONNEL AFFECTE sera donc fonction du nombre maximum d'employés mais aussi de l'avancement du projet.

**Fig. VIII.5.5**

On retrouvera ces principes appliqués à chacun des secteurs du modèle :



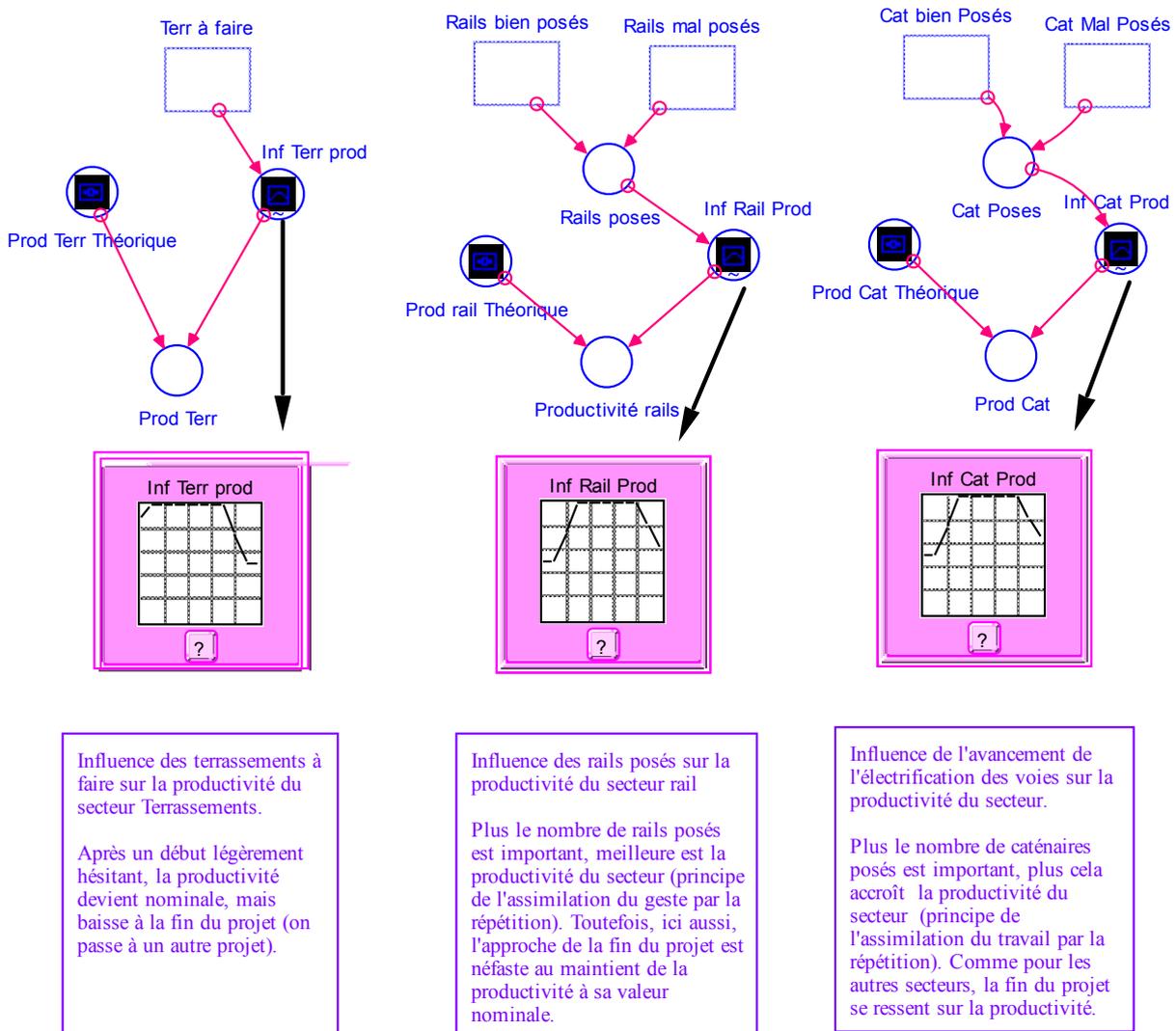
**Fig. VIII.5.6**

**La productivité :**

La productivité théorique, exprimée en km/employé/semaine, est donnée par le ou les responsables de chacun des secteurs. Elle résulte de l'expérience acquise par les sociétés qui effectuent le travail. C'est un paramètre de calage du modèle, spécifique de chaque secteur. Mais cette productivité théorique est modulée, secteur par secteur, par l'avancement du projet. On considère dans le cas présent (mais il serait dangereux de généraliser) que plus le travail avance (pose de rails par exemple), plus la productivité s'améliore grâce à l'effet d'expérience et d'augmentation de la vitesse d'exécution. Par contre, il a souvent été remarqué qu'en fin de projet, la productivité baissait quelque peu par effet de fatigue, de désintérêt, de transfert des collaborateurs les plus expérimentés vers d'autres travaux, etc.

Les productivités réelles seront donc fonction des productivités théoriques correspondantes, modulées par l'influence de l'état d'avancement du projet.

Les productivités (théorique et réelle) de chaque secteur sont exprimées en km / employé / semaine. Initialement, elles sont fixées à 1km / employé / semaine, mais chacune peut varier indépendamment de 0 à 10.



**Fig. VIII.5.7**

## La qualité :

Le raisonnement est semblable au précédent, avec des influences en cours de projet qui peuvent être différentes, mais aussi avec des graphes d'influence différents. La valeur théorique de chacune des qualités est fixée ici à 80%, quel que soit le secteur, mais on peut, à l'aide de curseurs, les faire varier indépendamment de 0 à 100%.

Ces données de qualité, hautement qualitatives, résultent avant tout de l'expérience des responsables de projet, des responsables de planification des sociétés coopérant au projet, des ingénieurs et cadres de chacun des secteurs, etc. On notera que, pour une société donnée, ces valeurs de productivité et qualité nominales varient assez peu d'un projet à l'autre. Ce sont là des paramètres caractéristiques des sociétés en question.

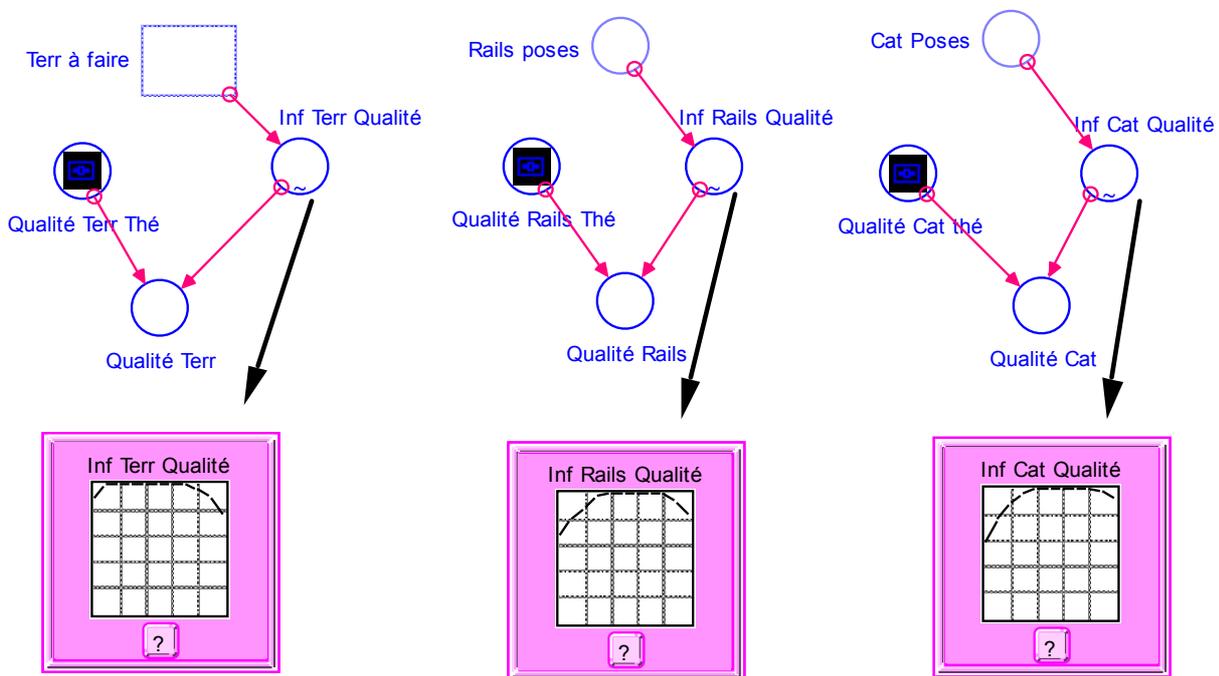


Fig. VIII.5.8

## Les simulations

Une première question se pose : comment valider un tel modèle ?

Comme pour tout modèle, surtout de Dynamique des Systèmes, plusieurs approches, complémentaires l'une de l'autre, doivent être utilisées autant que possible.

- une validation sur le passé, dans notre cas, une application du modèle à un projet passé, terminé, et dont on possède l'historique du développement.
- des tests de cohérence à l'aide de scénarios probables, possibles et même extrêmes (improbables, mais qui sont souvent le meilleur test de robustesse d'un modèle). Ces tests feront appel autant au bon sens du modélisateur qu'à l'expérience des experts du domaine.

Nous l'avons déjà dit, ce sont ces tests de validation qui exigent le plus de temps et d'attention.

Et rappelons encore une fois qu'en cas de résultat étonnant, inattendu, contre-intuitif, résultat qui justifie le travail effectué et promet un enrichissement dans la compréhension du système, un bon modélisateur met d'abord en cause son modèle, cherche l'erreur, un facteur oublié, etc., avant de crier victoire.

Mais répétons le, simuler des scénarios sera toujours moins coûteux que de faire des essais réels et d'en subir parfois des conséquences extrêmes.

Voici quelques courbes montrant le résultat de diverses simulations que le lecteur intéressé retrouvera assez aisément après avoir reconstruit le modèle, ou un modèle semblable correspondant plus à sa propre expérience ou à ses intérêts professionnels.

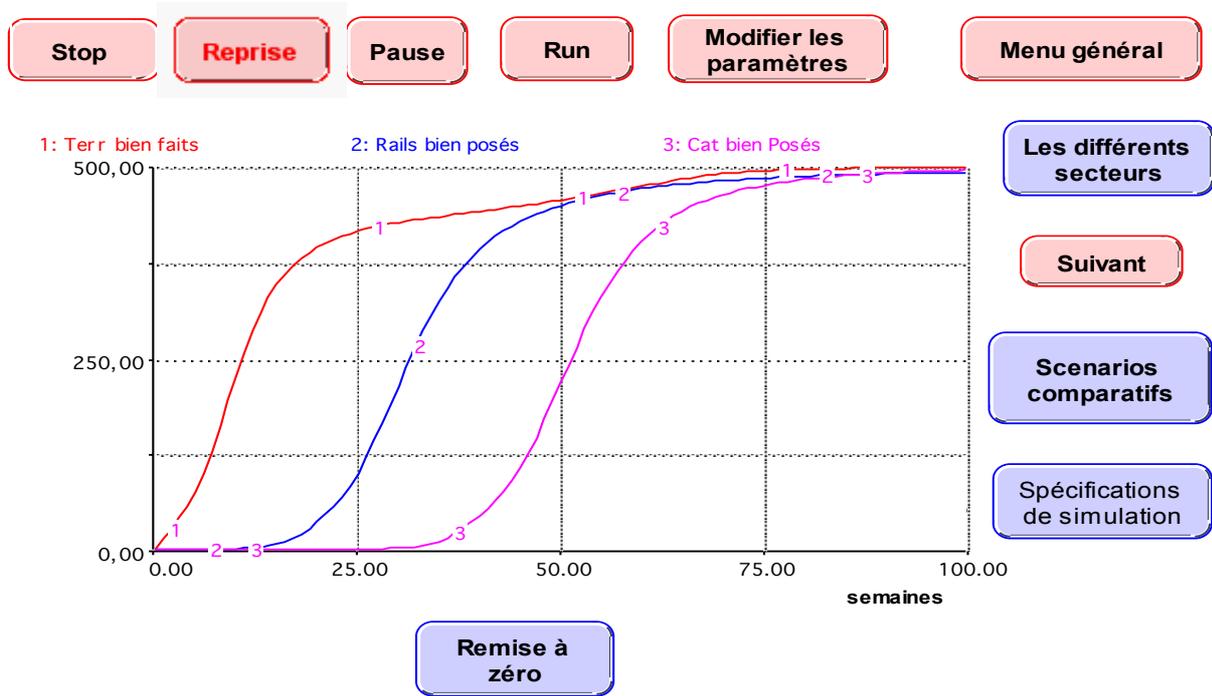
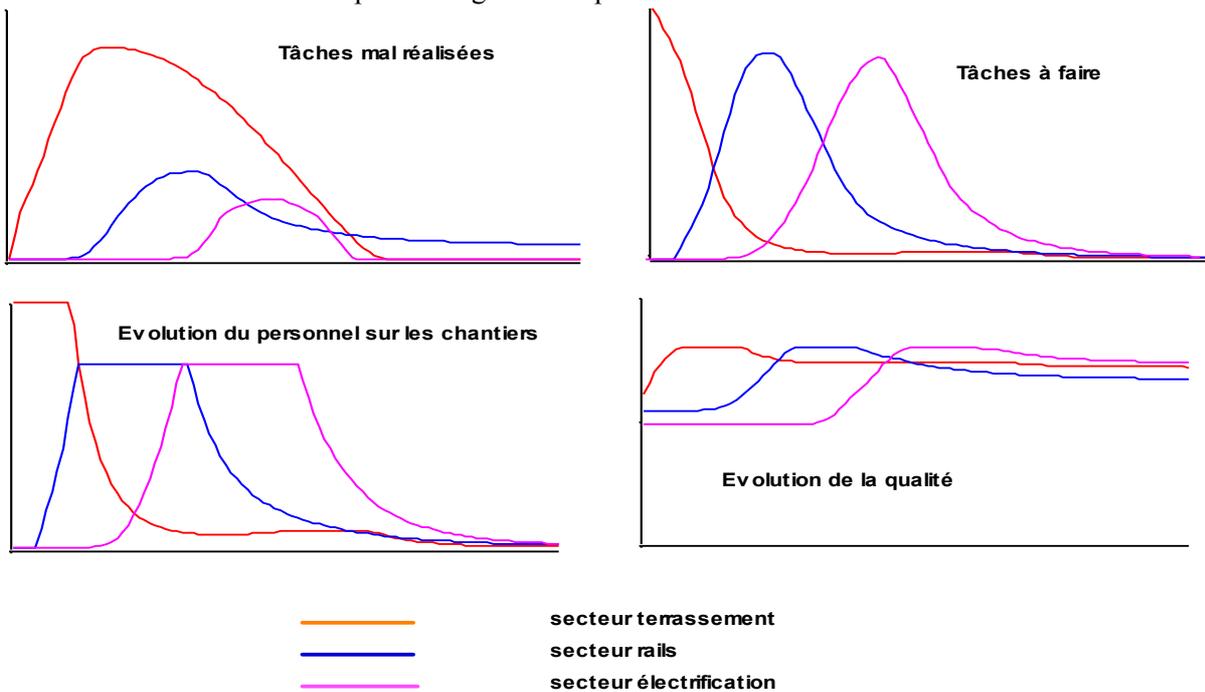


Fig. VIII.5.9

Incorporé au sein d'une des pages d'interface d'utilisation du modèle, le graphe ci-dessus montre l'évolution du projet, décomposé dans les trois secteurs : terrassement, rails, caténaires, secteurs dont nous avons vu qu'ils sont interdépendants l'un par rapport à l'autre. D'autres graphiques peuvent montrer l'évolution de toutes les variables du modèle, ou tout au moins celles qui peuvent intéresser les responsables du projet, les dirigeants, les responsables financiers, en vue d'informations et de décisions éventuelles...ou le modélisateur pour corriger ou adapter le modèle.



**Fig. VIII.5.10**

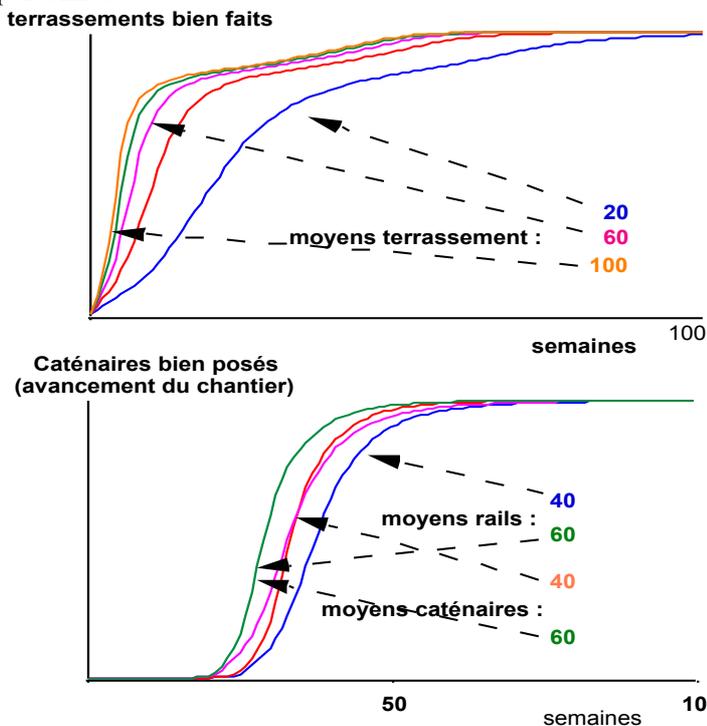
Plus un modèle est utilisé, testé, analysé, plus il génère des questions dont les réponses permettent de mieux appréhender la réalité complexe. Notre petit modèle de développement de ligne de TGV, quoique très simple, ne déroge pas à cette règle. Après avoir validé le modèle et évalué la durée du chantier compte tenu des valeurs des paramètres, nous pourrons :

- Faire des simulations comparatives pour vérifier les conséquences d'un accroissement de moyens en personnel,
- Evaluer les besoins du chantier pour que celui-ci soit terminé à une date donnée,
- Simuler les effets d'incident, telle une grève dans un ou plusieurs secteurs du projet.

Naturellement, un modèle opérationnel comportera quasi-obligatoirement un secteur financier qui, lui aussi, sera interconnecté avec la plupart des autres secteurs, et dont la présence risque de modifier les résultats tant techniques, qu'économiques ou financiers.

**Simulations Comparatives**

De telles simulations, aisées à réaliser quel que soit le logiciel utilisé, permettent de vérifier l'effet d'un accroissement des moyens (personnel) du chantier, secteur par secteur puis pour l'ensemble du chantier. Commençons par le secteur terrassement, en changeant le personnel maximum affecté, de 20 à 100 personnes :



On voit d'après ces 5 simulations que des moyens en personnel de 20 pour les tâches de terrassement sont nettement insuffisants, mais qu'au delà de 60, le gain est négligeable compte tenu des moyens alloués aux secteurs "rails" et "caténares"

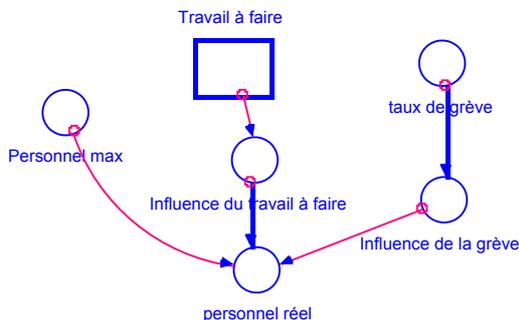
Faisons alors varier ces derniers, d'une part pour voir la sensibilité du système à ces paramètres, d'autre part pour déterminer les moyens nécessaires dans chaque secteur pour terminer le chantier au bout du délai exigé, par exemple 52 semaines

On voit qu'il faut affecter quelques 60 personnes aussi bien au secteur "rails" qu'à l'électrification, pour achever le chantier en un an. Au delà de ces chiffres, il est probable (le modèle est là pour le vérifier) qu'on gagnerait peu en délai mais qu'on perdrait beaucoup en coût.

**Fig. VIII.5.11**

Incidents de parcours (grève, accident de chantier, non-livraison de composants, etc.)

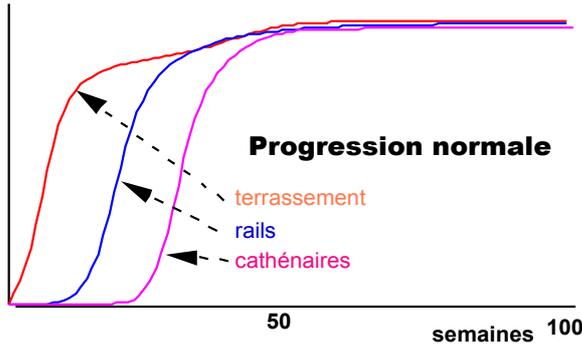
Si l'on s'en tient à la simulation d'une situation de grève, celle-ci n'aura d'influence directe que sur le personnel, donc les moyens utilisés. Le schéma de principe de la modélisation sera le suivant :



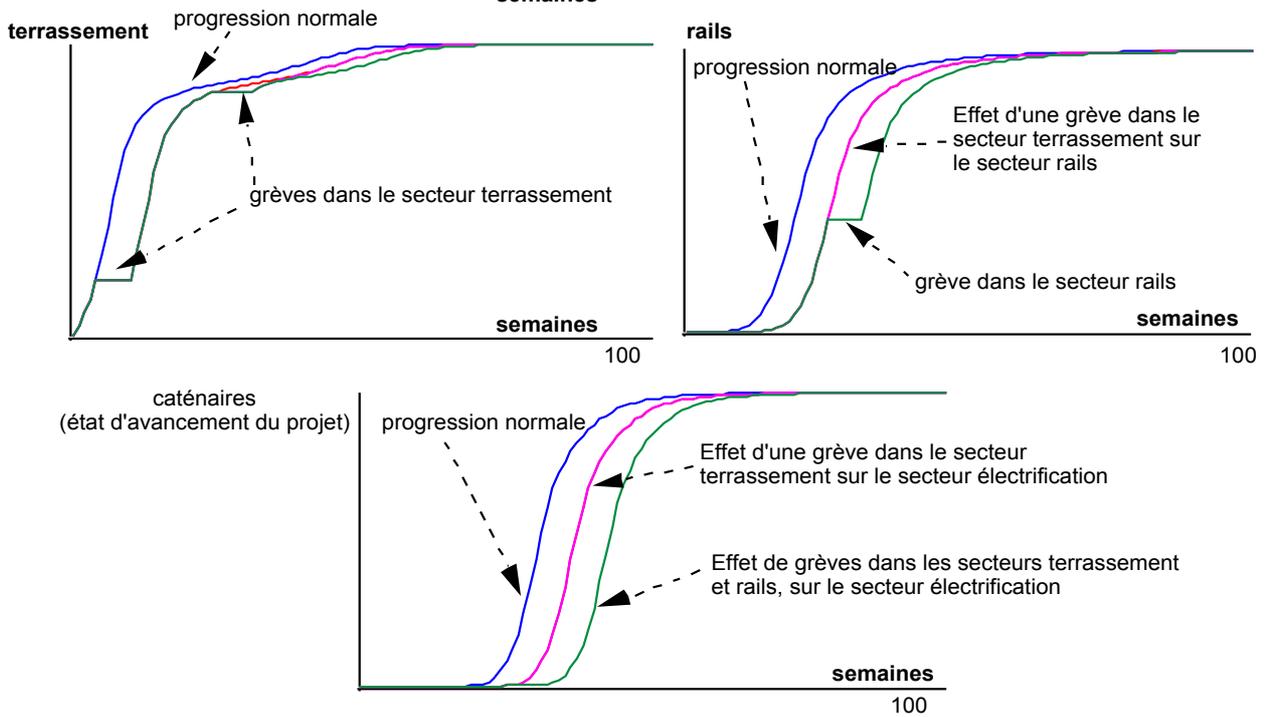
**Fig. VIII.5.12**

La variable « influence de la grève » - dont le taux peut varier de 0 à 100% - pourra être représentée par un graphe, linéaire ou pas : le nombre réel d'employés sur le chantier sera une fonction décroissante du taux de grève. Comme exemple, nous simulerons deux grèves dans le secteur terrassement, très tôt dans le projet puis plus tard, lorsque les terrassements sont très avancés. Pendant la deuxième grève, la pose des rails sera, elle aussi, perturbée par une grève dans ce secteur.

**Avancement des tâches**



On notera les effets respectifs de ces événements sur les différents secteurs. Une grève au temps 4 retarde tous les secteurs, alors qu'une grève tardive dans le secteur terrassement, n'a que peu d'effet sur les secteurs placés en aval.



**Fig. VIII.5.13**

Nous arrêterons là le développement de cet exemple et de l'application « gestion de grand projet » qui l'a généré. Notons qu'en pratique, les modèles correspondants peuvent être de très grande taille (plusieurs milliers de variables, constantes et relations) si le projet correspondant comporte de nombreux secteurs, mais que leur réalisation ne présente pas trop de difficultés dans la mesure où la modélisation de chaque secteur est très semblable à tous les autres. En pratique, on utilise les principes d'indigage qui permettent de reproduire de manière quasi-similaire les secteurs semblables, l'effort essentiel se portant sur la modélisation d'un premier secteur de base, et sur les relations d'interconnexion entre secteurs.

## **IX – Une Application dans le domaine Economique**

### **Le Marché Pétrolier Mondial**

Quitte à lancer un débat toujours fructueux, nous oserons affirmer que sans la démarche Dynamique des Systèmes Complexes, il n'est point de Prospective. Nous essayerons de le montrer sur un exemple réel, qui concerne l'analyse du fonctionnement et la prospective de l'un des principaux marchés de matière première. A l'occasion de cet exemple, nous montrerons :

- comment commencer et développer un tel modèle,
- quelques écueils pouvant apparaître lors du processus de validation,
- les avantages de la démarche utilisée, mais aussi certaines difficultés et même limites dans l'utilisation de l'outil.

#### **IX - 1 - Les Principales Hypothèses du Modèle**

Le modèle que nous allons décrire - appelé MARPET pour Marché Pétrolier - a été développé au sein de ELF-Aquitaine où il a fonctionné pendant une douzaine d'années. Nous ne développerons pas ici le modèle complet, au-delà de quelques principes de base, mais nous montrerons en détails un modèle MARPET simplifié qui a été développé récemment à l'occasion d'une des nombreuses crises pétrolières de ces dernières années.

##### **IX - 1 - 1 - Les Hypothèses de base**

Celles-ci sont à la fois simplistes et très sophistiquées.

Simplistes en ce sens que nous ne prenons en considération qu'un seul type de brut - un brut moyen, l'Arabe léger il y a une dizaine d'années, le Brent maintenant - un seul type de producteur ainsi que de consommateur, agissant dans un contexte d'offre et de demande. Ce choix s'explique par le désir de se limiter aux grandes tendances économiques du marché, en éliminant les phénomènes plus marginaux tels que la compétition quasi-quotidienne entre divers types de bruts, les comportements différenciés des consommateurs et des producteurs selon les régions, les régimes politiques, etc..

Mais ce modèle est très complexe en ce qui concerne les relations, les modes de comportement, l'analyse des forces de nature économique, psychosociologique ou autre, qui influencent les prix, la demande, les productions vraies ou désirées, les stocks, les anticipations.

C'est cette prise en compte en continu, à chaque instant, de l'ensemble des phénomènes en présence - forces, évolution des situations - qui nous permet d'être sensibles à des poussées infinitésimales mais prolongées, de ne pas passer outre à des modifications structurelles faibles mais potentiellement lourdes de conséquences à long terme.

Interagissent ainsi de manière continue :

1 - des poussées économiques sans cesse présentes, résultant de la compétition entre offre et demande. Ces forces peuvent agir :

- à court terme : effet du rapport offre-demande sur les prix, la situation des stocks, etc...
- à moyen terme : élasticité de la demande au prix, influence des prix sur les efforts d'exploration, de production, d'économies structurelles d'énergie, etc..

2 - des accélérations de nature psychologique (spéculation) ou financière (opérations de couverture).

3 - des viscosités psychosociologiques : élasticités, accoutumance à des variations de prix, viscosités qui se traduisent le plus souvent par des retards, des délais de réaction aux événements.

Par exemple, couverture et prix sont reliés par une relation de type économique

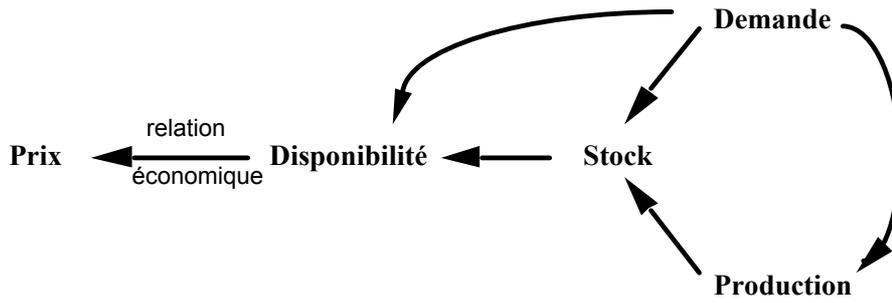


Fig. IX.1

En fait, la variable que nous appelons "Couverture" ou "Disponibilité" agit moins en fonction de sa valeur absolue qu'à travers sa valeur "désirée" (qui peut être la valeur à laquelle on s'est habitué à la longue). En constatant cela, nous avons introduit une relation psychologique de type "flou".

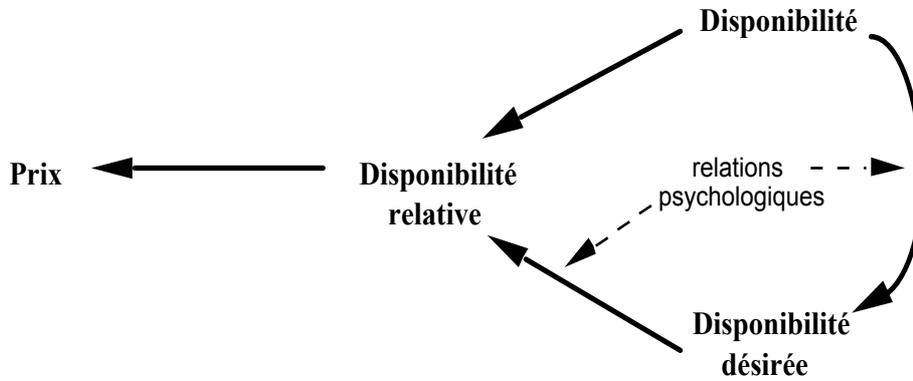


Fig. IX.2

**IX - 1 - 2 - La Structure Générale du modèle**

Comme de nombreux autres marchés de matières premières, le marché du pétrole peut être représenté par un emboîtement de trois structures fondamentales qui opèrent simultanément, tout en correspondant à des réalités différentes.

1) - Un marché réel de l'offre et de la demande dont nous avons déjà décrit ci-dessus les principales variables : offre, demande, stocks, prix. Ce secteur est traité de manière classique, mais en tenant compte des phénomènes dynamiques qui lui sont propres : retards, rétroactions, cumuls.

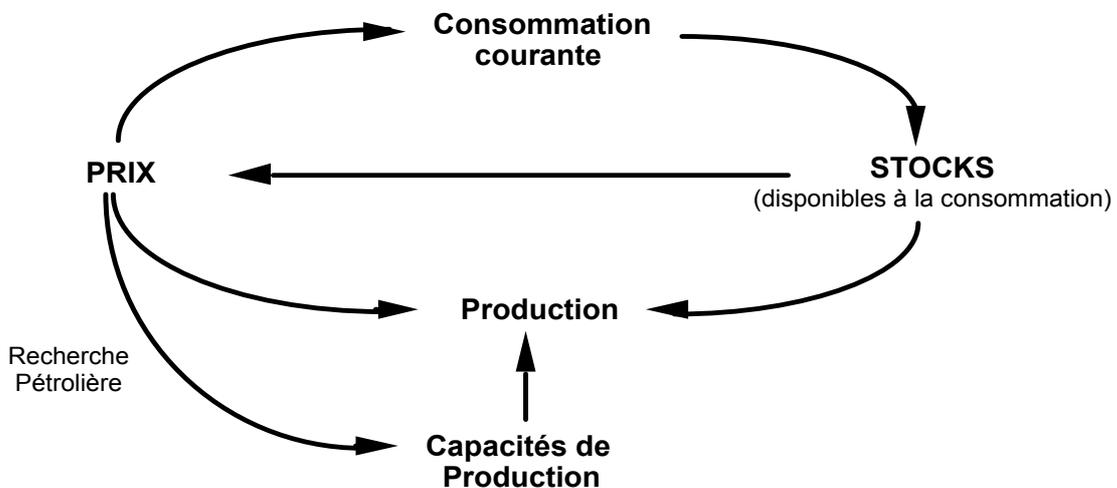


Fig. IX.3

Avant de poursuivre, notons que ces schémas ne sont pas spécifiques au marché pétrolier, et qu'ils peuvent être utilisés pour démarrer toute étude de marché, que ce soit de matières premières ou de produits finis.

Concernant le marché pétrolier, ce que nous appelons la demande correspond en fait, à la consommation courante, peu ou lentement évolutive, de produits pétroliers, consommation issue de besoins réels immédiats (transports, chauffage, production industrielle, chimie). Normalement, demande et production s'équilibrent. En cas de pénurie, on se fournit sur les stocks disponibles, ceux-ci étant un facteur important de l'évolution des prix.

Au sein de ce secteur, les prix n'ont pas d'influence immédiate sur le marché. A long terme toutefois, ils influent sur les efforts d'exploration, donc sur les réserves connues et surtout exploitables de brut, donc sur les capacités de production. Par ailleurs, ils agissent sur la consommation, par restriction de la demande (effet court terme), par économie d'énergie (effet technologique à moyen et long terme), enfin par substitution progressive d'autres types d'énergie (effet long terme).

Naturellement, de nombreux "incidents" politiques peuvent perturber ce marché de type libéral, aussi bien dans la réalité - nous l'avons tous vécu - que dans notre modèle. De tels incidents donneraient lieu, même avec cette structure simplifiée du marché, à des variations de prix sans commune mesure avec les évolutions habituellement lentes, d'origine purement économique. Néanmoins, nous avons pu vérifier à plusieurs reprises, que l'offre et la demande ne pouvaient à elles seules, expliquer l'amplitude et surtout la dynamique rapide du phénomène de flambée des prix que nous avons connu à plusieurs reprises dans un passé récent. Aussi avons-nous été obligés d'introduire les notions d'anticipations et les transactions correspondantes (deux secteurs supplémentaires au sein du modèle).

2) - Un secteur de transactions par anticipation correspondant à un désir économique ou à un besoin politique ou stratégique de couverture. Issues d'une comparaison sans cesse renouvelée entre la situation présente et celle anticipée à plus ou moins courte échéance (voir la note en commentaire au § retards page 15), ces transactions, relativement faibles par rapport au volume habituel d'offre et de demande, ont néanmoins une très forte influence sur les prix.

La crainte ou la constatation de la réalité d'une crise politique qui pourrait se traduire par une rupture d'approvisionnement, est en général cause d'achats de précaution, soit de la part d'opérateurs ou même de la part de certains Etats qui s'estimeraient particulièrement menacés par une crise.

De tels achats, prélevant sur les stocks disponibles, et effectués dans un climat d'inquiétude, ont un fort effet inflationniste sur les prix.

Inversement, une situation politico-économique apparemment stable, génère une tendance au déstockage. L'apparition de surplus de produit sur un marché calme a un effet déflationniste sur les prix (effet déflationniste qui peut être généré par la seule connaissance de l'existence d'un stock pouvant devenir disponible à tout instant).

Ces transactions opèrent au sein d'une boucle positive, c'est-à-dire au sein d'un cercle vicieux : résultant d'informations anticipées, ces transactions ont des effets qui tendent à confirmer les anticipations : flambée des prix en cas d'achats effectués par crainte d'une hausse des prix, chute des prix due à un déstockage consécutif à la morosité du marché.

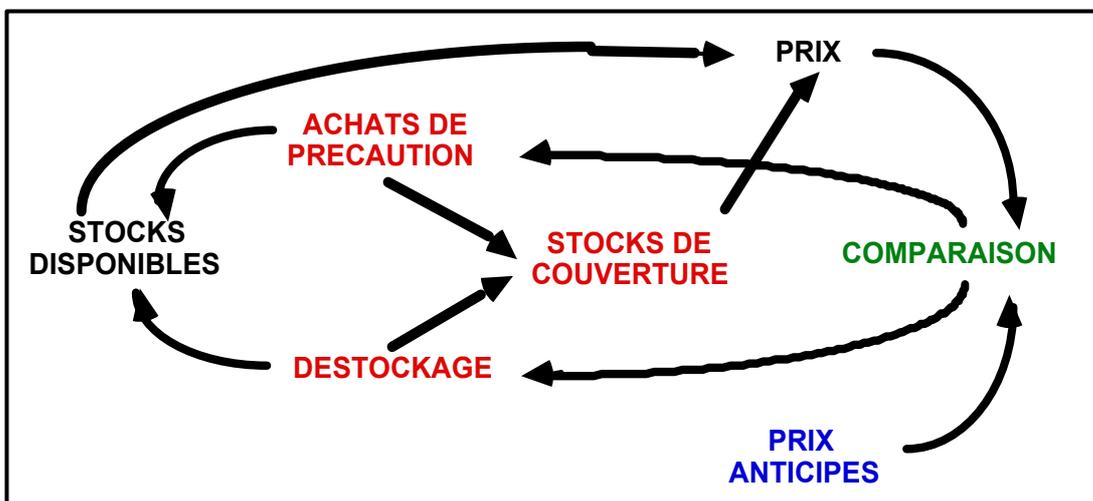


Fig. IX.4

## 3) - Le monde des anticipations

On pourrait épiloguer sur l'interconnexion de deux sphères temporelles différentes, celle du temps présent et celle d'un avenir anticipé. Plus prosaïquement, nous considérons que les acteurs du marché pétrolier agissent en fonction de la valeur actuelle de certaines variables (connaissance du prix, évaluation des stocks) et de variables, souvent les mêmes, anticipées dans un avenir plus ou moins éloigné, toutes ces variables agissant essentiellement par comparaison les unes avec les autres.

Mais à la différence de la réalité au temps présent, ces anticipations sont imaginées et peuvent donc évoluer d'une manière quasi-instantanée et de manière erratique. Les constantes de temps étant très courtes, l'influence de ce secteur sur l'ensemble du marché peut être quasi immédiate.

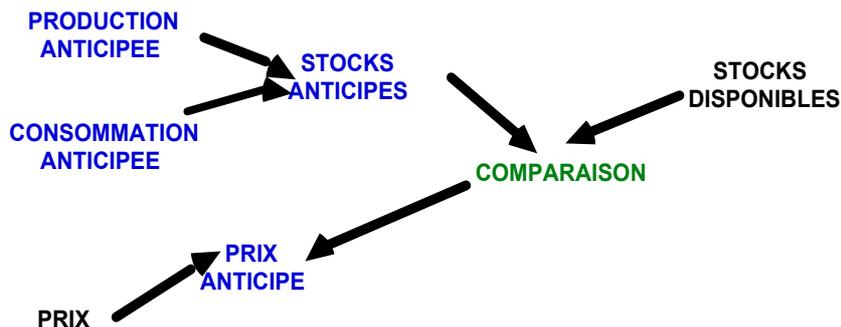


Fig. IX.5

Nous laissons au lecteur intéressé ou au modélisateur chevronné le soin d'interconnecter ces secteurs (cf. Revue Internationale de Systémique, Vol 5, N°2, 1991, pp. 143 à 155). L'ensemble du modèle constitue indubitablement une structure complexe dont l'utilisation, malgré les progrès réalisés ces derniers temps dans la réalisation d'interfaces conviviales, n'est pas toujours aisée. Par contre, la réalisation et l'exploitation d'un modèle complexe permet souvent, en passant par une version simplifiée de ce modèle, d'analyser, de comprendre et d'expliquer des phénomènes qui ne font pas intervenir qu'une fraction de la réalité ainsi que du modèle correspondant.

C'est dans cet esprit que nous allons présenter une version très simplifiée du modèle MARPET, que nous avons appelé tout naturellement « Mini-Marpet ».

Mais auparavant, il serait intéressant de vérifier la validité, l'utilité ainsi que la qualité de l'outil prospectif qu'est MARPET. Cette qualité peut être évaluée selon deux critères :

- 1) les tendances suggérées ont-elles été vérifiées dans la réalité ?
- 2) la création, le développement et l'utilisation du modèle ont-ils aidé l'utilisateur à mieux comprendre, mieux percevoir les complexités du problème posé ? L'ont-ils aidé dans son processus de décision ?

## IX – 2 - Validité de l'outil

En ce qui concerne la qualité du modèle en tant qu'outil prospectif, nous pouvons reproduire une phrase tirée d'une note diffusée à la mi-août 1990 sur la base des résultats de simulation, et qui concluait que les événements du Moyen-Orient "semblent devoir repousser sinon anéantir les tendances à la reprise de la demande pétrolière qui allaient aboutir, sans doute d'ici deux à trois ans, à une forte remontée naturelle des prix...(après la flambée actuelle des cours), les événements (du Golfe) devraient être à l'origine, à moyen terme, d'une dynamique prolongée de baisse des prix". (Note K.B.S. du 11/08/1990). Tout ceci s'est vérifié !

Un peu plus tard, des courbes publiées en Janvier 1992 (28), montraient une forte tendance à la baisse (insoupçonnée à l'époque) pendant quelques années, suivie d'une reprise dont l'exactitude en valeur, en date et en durée nous a nous-même surpris.

Il est arrivé une fois au modèle MARPET de donner des résultats qui se sont trouvés être à l'opposé de la réalité. La description de cet "incident" montrera les limites, mais surtout une des difficultés majeure dans l'utilisation de l'outil.

Lors d'une série de scénarios effectués en Décembre 1990, pendant la crise du Golfe mais avant le déclenchement des hostilités, le scénario "guerre", simulant un déclenchement effectif des hostilités contre l'Irak, prévoyait une flambée des prix du brut pouvant aller jusqu'à 60\$/baril (on en était à l'époque à 40\$/baril). Or la réalité fut tout autre. Quelques jours après le début des opérations, le prix du baril était tombé à 20\$/baril. Que s'était-il passé ? Où nous étions-nous trompés ?

Parmi les variables d'entrée du modèle, c'est-à-dire les paramètres qu'il faut définir lors de tout scénario, l'"inquiétude politique" a un nom bien explicite et une action qui ne l'est pas moins. Sans avoir d'effet sur le marché normal de l'offre et de la demande (la consommation moyenne), cette variable accentue, dans certaines conditions qui étaient bien présentes vers la fin 90, à la fois le risque de flambée d'achats spéculatifs de précaution, et la tendance à la montée rapide des prix (si celle-ci a effectivement lieu).

Témoins un peu naïfs de la crise qui secouait le Moyen-Orient à ce moment-là, nous pensions qu'une guerre serait une cause majeure et immédiate d'"inquiétude politique", et que celle-ci aurait effectivement et très rapidement pour conséquence de faire monter les prix du baril de brut à des niveaux records.

Or c'est l'inverse qui se produisit !

A posteriori, l'explication est d'une simplicité évidente. Après une montée initiale des prix, pendant les premières 48 heures du conflit, le marché pétrolier, ayant constaté que les Alliés étaient vraiment maîtres du ciel et que l'issue du conflit ne faisait aucun doute, abandonnait toute inquiétude quant à la disponibilité à venir des sources d'approvisionnement ; la variable "inquiétude politique", au lieu de flamber, tombait brutalement à zéro, entraînant les prix dans une chute d'amplitude semblable.

En réalité, le modèle n'était pas en cause. C'est le scénario qui avait été mal défini, l'utilisateur du modèle qui avait mal perçu l'évolution de l'environnement (politique) du marché pétrolier.

Ceci nous amène à une des difficultés majeures dans l'utilisation des modèles prospectifs, à savoir la nécessité de poser la bonne question, en particulier d'oser envisager des scénarios "irréalistes", impensables avant qu'ils n'arrivent. Pourtant de tels scénarios ont un triple avantage :

- malgré leur aspect improbable, ils peuvent se réaliser (l'expérience montre que c'est souvent ces scénarios qui se réalisent effectivement), et il vaut mieux en avoir analysé les conséquences qui peuvent être aussi extrêmes qu'inattendues.

- ils obligent le modèle à opérer aux limites, ce qui permet de vérifier la robustesse de l'outil, de le corriger en cas de besoin.

ce sont ces scénarios extrêmes qui portent en eux le plus d'enseignements, qui peuvent le mieux aider l'utilisateur - modélisateur, expert, décideur - à comprendre, percevoir, analyser les complexités du domaine étudié, qui lui donnent le maximum d'éléments pour décider, mais aussi de confiance dans la validité de la décision.

Par ailleurs, notre modèle du marché pétrolier aide-t-il à comprendre ce marché, dans son ensemble ainsi que dans certains détails ? Donnons un exemple d'analyse qui peut aider à comprendre certaines réactions du marché, analyse qui résulte elle-même de l'utilisation répétée du modèle.

La question se pose de comprendre pourquoi les décisions et les actions de l'OPEP n'ont pas toujours l'effet escompté ? Il arrive qu'une décision de réduire la production de l'OPEP génère une flambée des prix, mais il arrive aussi que cette même décision n'ait aucun effet. Nous proposons une explication simple, plus structurelle que conjoncturelle, illustrée par les deux schémas suivants :

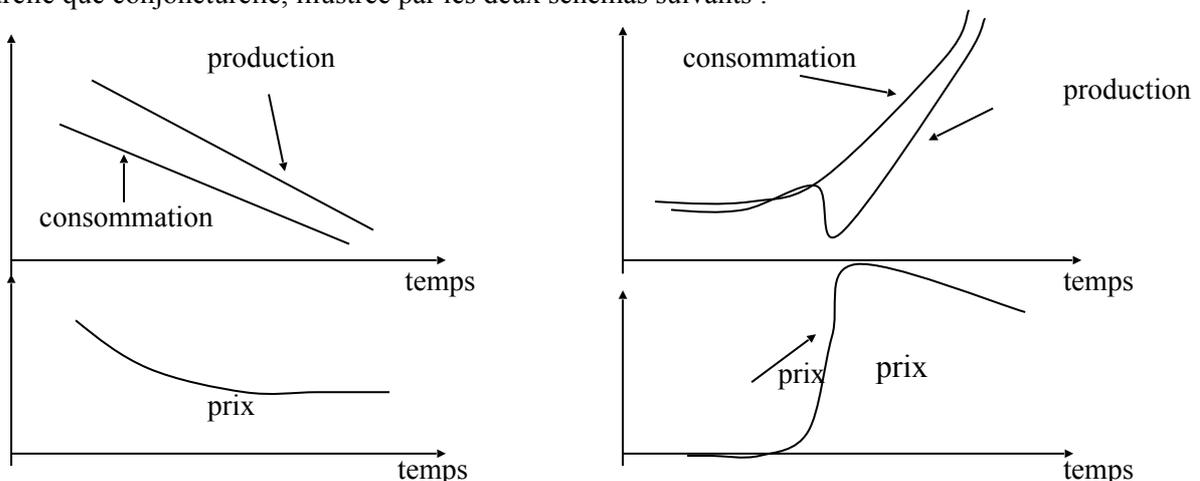


Fig.IX.6

Dans le premier cas (Figures de gauche), la consommation baisse, résultat d'économies faisant suite à une forte hausse antérieure des prix, plusieurs années auparavant.

La production est obligée de diminuer, cette baisse étant supportée essentiellement par l'OPEP plus quelques pays exportateurs comme le Mexique. Mais cette baisse de production, faite à contre cœur, est toujours en retard sur la baisse de consommation, d'où la poursuite de la baisse des prix. Même en cas de décision de baisse importante de production OPEP, les délais d'application, le non respect total de cette décision, et la poursuite de la baisse de consommation, ont pour conséquence de très vite annuler l'effet escompté de la décision OPEP.

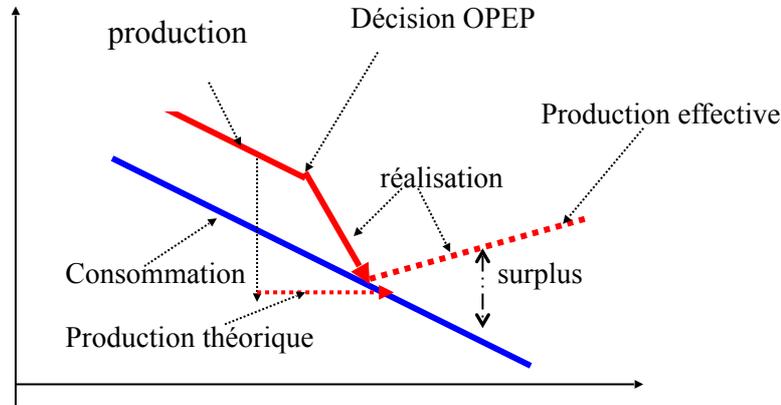


Fig.IX.7

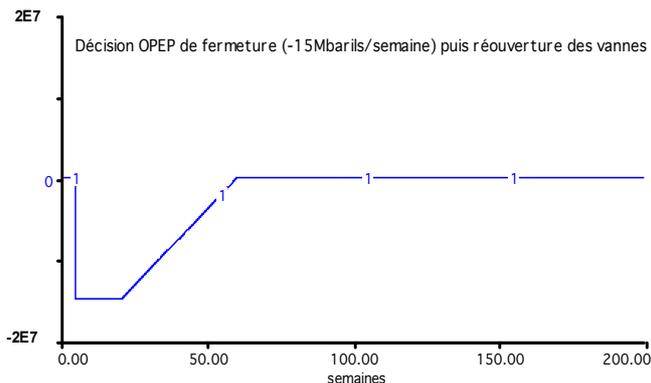
Dans le cas d'une consommation croissante, une décision de baisse de la production a un effet très fort sur les prix : on peut refaire le dessin ci-dessus, le mot « surplus » deviendra le mot « manque ». Et même une ouverture des « vannes » pourraient ne pas suffire pour faire redescendre les prix, au mieux les stabiliser au bout d'un certain temps à un niveau élevé. Plus tard, le prix du brut baissera à nouveau, à cause :

- d'une baisse progressive de la consommation
- d'une remontée des moyens de production (exploration – production),
- d'une ouverture – pas toujours officielle – des vannes par des producteurs en mal de profits d'autant plus élevés que les prix sont intéressants,
- d'une remise sur le marché des stocks de couverture accumulés pendant la hausse des prix (il faut bien l'utiliser, ce carburant ou ce fioul acheté à l'avance, en trop par rapport aux besoins, et dont la valeur est en train de diminuer).

### IX – 3 – Mini-MARPET

Ce petit modèle, qui peut être transposé - en l'adaptant - à l'analyse du marché de n'importe quelle matière première ou, dans une certaine mesure, de tout produit manufacturé, comporte quatre secteurs concernant :

- les stock et la couverture,
- la consommation,
- la production,
- les prix.

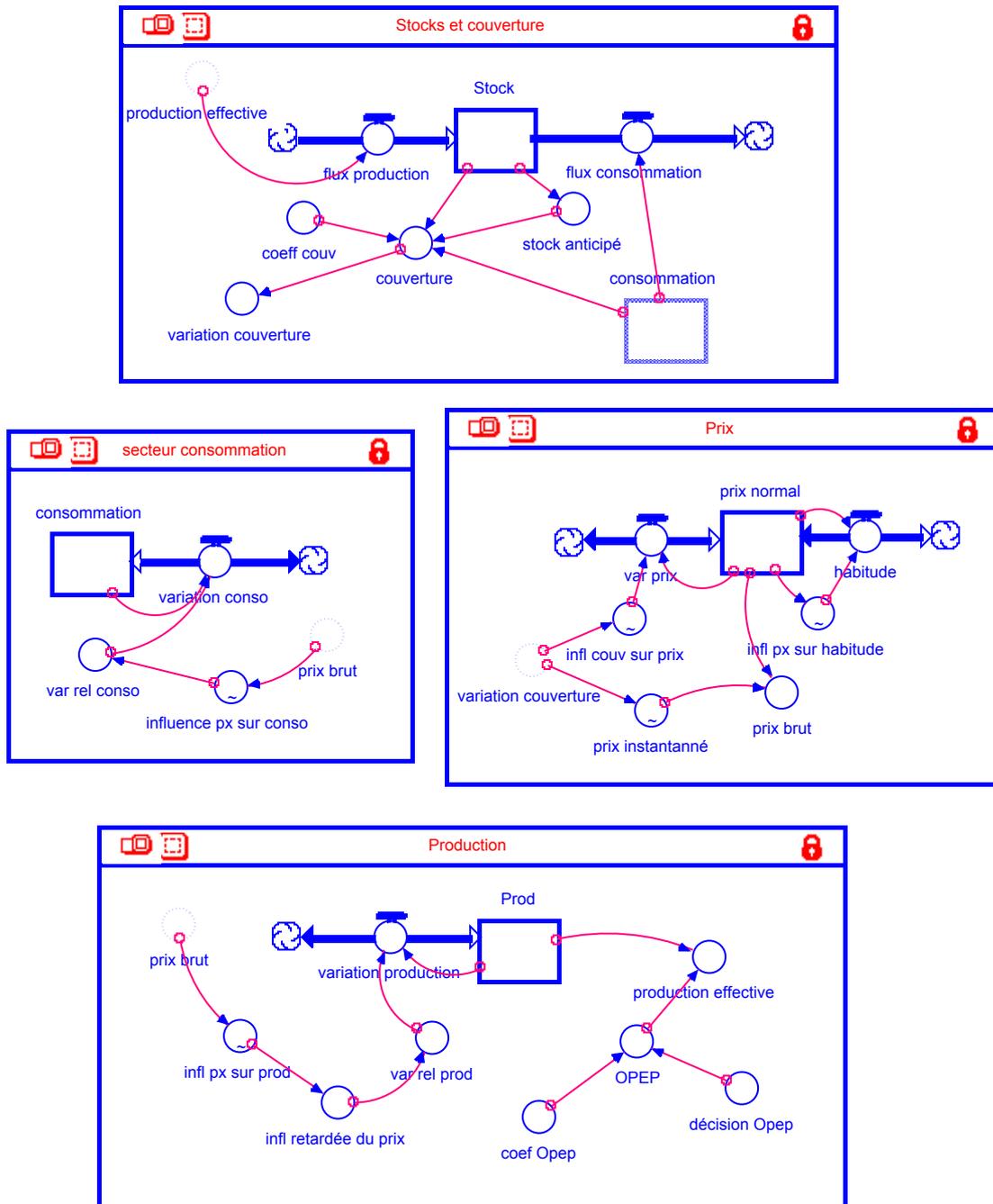


Dans chacun de ces secteurs nous avons défini une variable d'accumulation.

Les stocks résultent de l'accumulation des flux de production moins les flux de consommation, la consommation et la production résultent des variations respectives des variables correspondantes, le prix est considéré aussi comme une variable d'accumulation.

Consommation et Production sont influencés par le prix, celui-ci étant à son tour influencé par la couverture en produit, donc

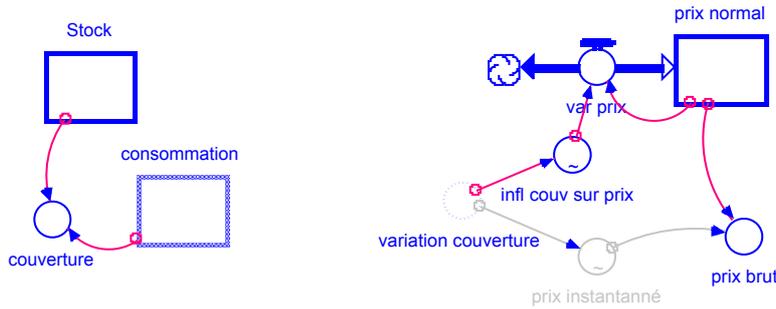
indirectement par la production et la consommation. La production effective résulte de la production normale et des décisions d'ouverture/fermeture des vannes par l'OPEP, ces dernières étant représentées par la courbe ci-contre. Les quatre secteurs constituant Mini-MARPET sont schématisés ci-après.



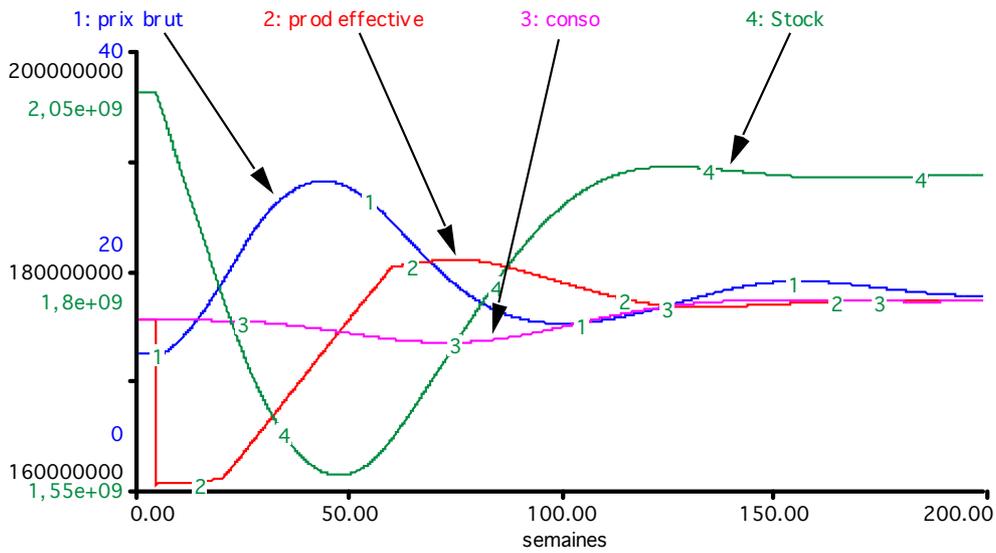
**Fig.IX.8**

Nous allons montrer trois variantes successives de ce petit modèle, ceci dans le but de montrer des étapes progressives dans la modélisation d'un processus.

Schéma 1 – a) pas d’anticipations sur les stocks,  
 b) la variable PRIX n’est représentée que par une variable d’accumulation



Les courbes qui suivent montrent l’évolution des variables essentielles, en réponse à la politique de production de l’OPEP.



Sans anticipations ni variations brusques de prix

Fig.IX.9

Les résultats paraissent cohérents, pourtant on sait que dans le passé, lors de fermetures des « robinets » par l’OPEP à des moments opportuns (cf. plus haut), les prix montaient beaucoup plus rapidement, en quelques petites semaines et non en un an, progressivement comme on voit sur la fig.IX.9 ci-dessus.

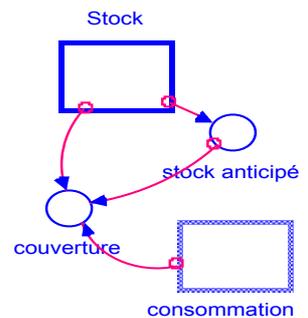
Nous avons donc introduit deux modifications successives :

Prise en compte des anticipations sur les stocks, dans l’appréciation de l’évolution des prix.

Ceci revient en quelque sorte à simuler, dans une certaine mesure, les notions et l’influence des actions de couverture ou de spéculation. Les courbes de la figure IX.10 montrent une meilleure simulation de la réalité, c’est-à-dire un prix qui monte jusqu’à environ 35\$/baril.

Toutefois, cette montée n’est encore que progressive, beaucoup moins rapide que dans la réalité. Ceci est dû essentiellement au fait que nous avons modélisé les prix comme étant une variable d’accumulation, dont la valeur ne pas varier instantanément.

Ceci nous amène à modifier la représentation de la variable prix : les variations lentes restent représentées par une variable d’accumulation, mais les variations rapides de stock (c’est-à-dire de couverture) doivent pouvoir





## X - MODELISATION DU PROCESSUS D'INVESTISSEMENT EN MOYENS DE PRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons mentionné des moyens ou capacités de production (outils de production, usines, réserves exploitables et puits disponibles, etc.) qui évoluent, comme beaucoup d'autres variables, avec le temps en fonction de l'état du système économique ou de la structure de production analysée.

Les pages qui suivent sont destinées à montrer comment modéliser les processus d'investissement qui permet de développer et de faire évoluer ces moyens de production.

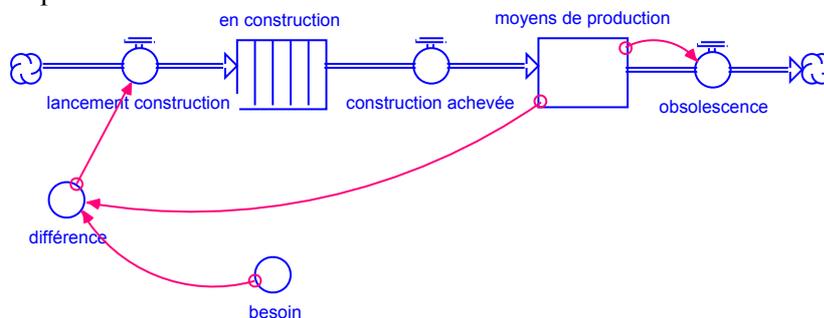
Mais à cette occasion, nous montrerons non seulement diverses étapes de modélisation, mais aussi combien dans certains cas, il peut être difficile de transposer les résultats du modèle en conseils et suggestions applicables dans la réalité.

Le processus à modéliser peut être résumé ainsi : développer des capacités de production en fonction de besoins évalués par ailleurs et qui, naturellement, sont évolutifs (dans ce qui suit, ces besoins seront considérés comme exogènes, mais dans la réalité, les besoins en moyens de production dépendent de l'ensemble du système technico-économique, une structure véritablement systémique).

Nous développerons le processus en question en quatre étapes successives :

### X - 1 - Comparaison : besoins – moyens disponibles

On compare simplement et à chaque instant les besoins avec les moyens disponibles, et si cette différence (on voit apparaître là, à nouveau, cette notion d'écart entre les variables but et situation réelle, que les automaticiens appellent signal d'erreur) est positive, on investit dans le développement de nouveaux moyens de production.



$$\text{lancement construction} = \text{besoin} - \text{moyens de production}$$

**Fig.X.1**

La variable « en construction » symbolise le fait qu'il y a des moyens en développement pendant un certain temps (délai de réalisation, par exemple 2 ans). On notera que la variable de flux « lancement construction » ne peut être que positive ou nulle : on ne peut pas avoir une construction négative.

La Fig.X.2 montre l'évolution des moyens de production correspondant à des besoins représentés sur la courbe 1 (montée brusque suivie d'une montée progressive, maintien de besoins constants, puis baisse progressive jusqu'au retour au niveau initial)

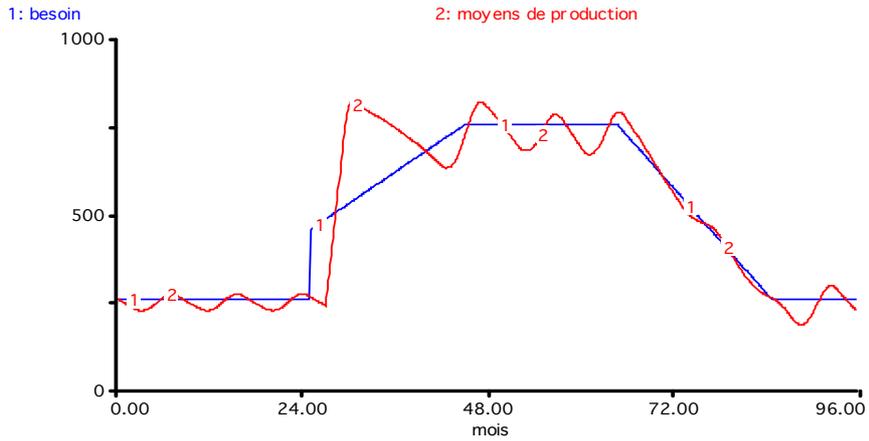


Fig.X.2

On constate que les investissements et donc la capacité produite, oscillent assez fortement. En pratique, cela implique une succession de sur puis sous-investissements, un comportement peu satisfaisant. La raison de ces oscillations est simple : en lançant en construction exactement la différence entre besoins et moyen existants, on oublie de prendre en compte ce qui vient d’être décidé, ou est déjà en cours de réalisation. On commande trop et, quelque temps plus tard, lorsque les moyens dépassent les besoins, on arrête tout investissement, ce qui réduit les moyens disponibles (par vieillissement, obsolescence, usure) en dessous des besoins, etc.

**X - 2 - Prise en compte des moyens en construction**

Il faut – et c’est ce que font la plupart des décideurs – prendre en compte, au moment de la décision d’investissement, ce qui est déjà en cours de construction. D’où le schéma amélioré suivant, où le flux lancement en construction prend en compte la quantité de construction en cours de réalisation.

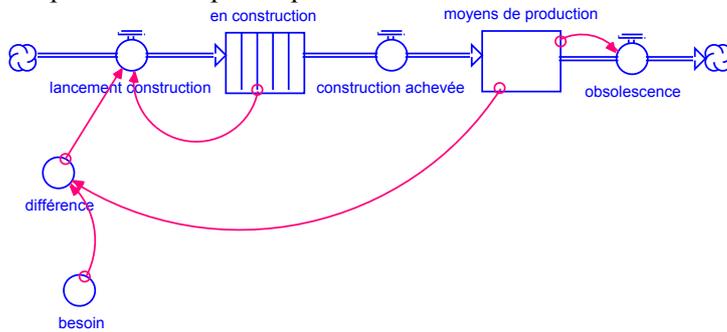


Fig.X.3 : Régulation Proportionnelle

Le graphique d’évolution (Fig.X.4) des moyens disponibles montre un retard systématique dans le développement des moyens par rapport aux besoins.

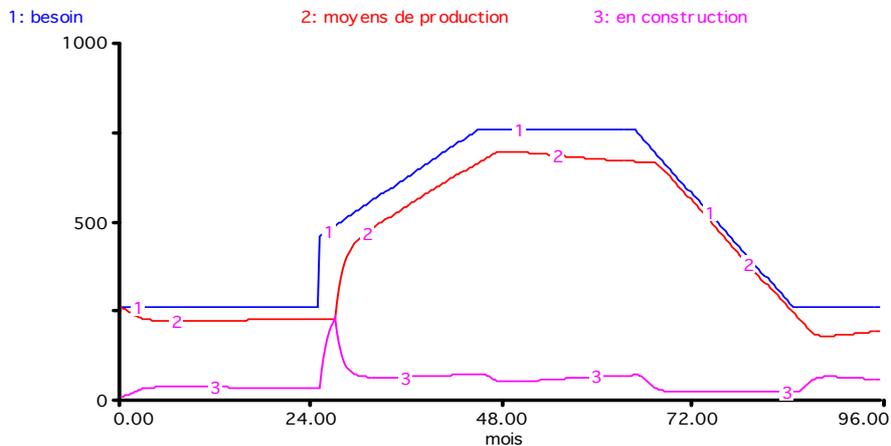


Fig.X.4

Peut-on corriger ce retard ?

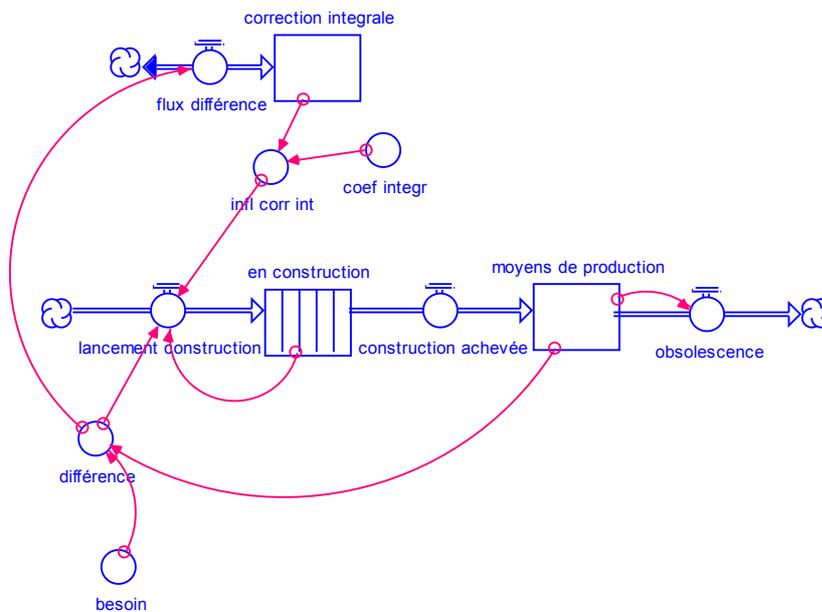
C'est dans la réponse à cette question qu'apparaissent certaines différences entre modèle et réalité, ainsi que des difficultés parfois à proposer des solutions compréhensibles et applicables.

Le modèle que nous avons décrit ci-dessus, qui représente assez bien la réalité des prises de décision concernant les investissements en moyens de production, correspond à un asservissement (régulation) dit « en position ». A chaque instant, on prend en compte l'état du système, mais ni les informations historiques, ni les informations concernant les changements instantanés, rapides, du système. Un tel asservissement présente toujours un écart non nul entre consigne (besoins) et résultat (situation réelle). Pour corriger cet écart, les automaticiens utilisent une régulation dite « Proportionnelle – Intégrale » (PI) ou, encore mieux « Proportionnelle – Intégrale – Différentielle » (PID). Ces modes de régulation, que nous allons expliciter dans les paragraphes qui suivent, sont aisément applicables lorsqu'il s'agit de machines, de circuits électroniques, éventuellement d'usines, de centrales nucléaires, de raffineries. Notre problème sera de trouver comment appliquer ces mêmes techniques au processus de prise de décision.

### X – 3 - La Régulation PI (Proportionnelle – Intégrale)

A l'écart entre besoins et moyens existants, on ajoute une fraction du cumul (intégrale) de ce même écart. Cela revient à prendre en compte le passé, aussi bien en ce qui concerne les besoins que les moyens disponibles, en fait l'évolution dans le passé de la différence entre ces deux variables, c'est-à-dire la mémoire des erreurs du passé.

Le schéma correspondant est le suivant, facilement déduit de celui de la figure X.3.



**Fig.X.5 : Régulation Proportionnelle – Intégrale**

On calcule l'intégrale (accumulation) de la différence entre besoins et moyens disponibles et on en tient compte – après pondération par un coefficient – dans le lancement construction, c'est-à-dire dans les investissements à faire. Le graphe de réalisation des moyens de production en fonction de l'évolution des besoins, montre l'intérêt de ce type de régulation, qui permet aux moyens réalisés de suivre d'assez près les besoins. On constate seulement un certain retard de réalisation lors des variations rapides des besoins (vers  $t = 24$  mois).

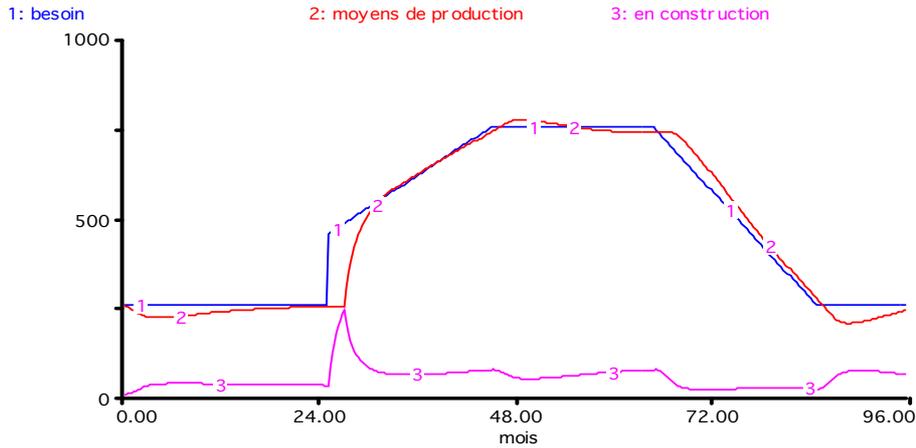


Fig.X.6

C'est ce retard que l'on va essayer de réduire en utilisant la régulation "PID.

**X – 4 - La Régulation PID**

Puisque la régulation PI n'est pas tout à fait satisfaisante lors de variations brusques de la variable d'entrée (les besoins), nous allons accélérer la réponse du système lors de telles variations. Or celles-ci peuvent être caractérisées par la dérivée du signal d'entrée : plus rapide est la variation, plus forte est la dérivée. Les figures X.7 et X.8 montrent la prise en compte de cette vitesse de variation des besoins ainsi que le résultat.

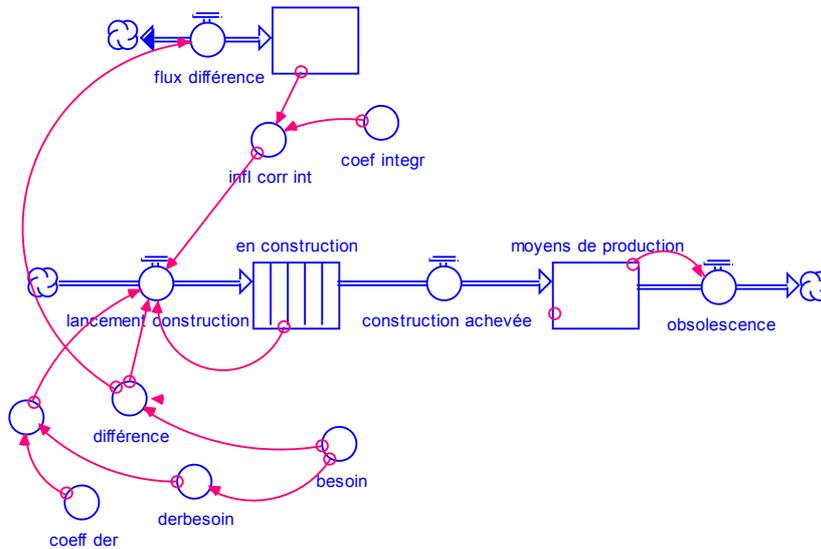


Fig.X.7 : Régulation Proportionnelle - Intégrale – Différentielle

Derbesoin = dérivée de la variable « besoin »  
 coeff der = coefficient de pondération de l'effet différentiel  
 Lancement construction = différence – en construction + infl corr int + infl der besoin  
 = régulation proportionnelle + correction intégrale + correction différentielle

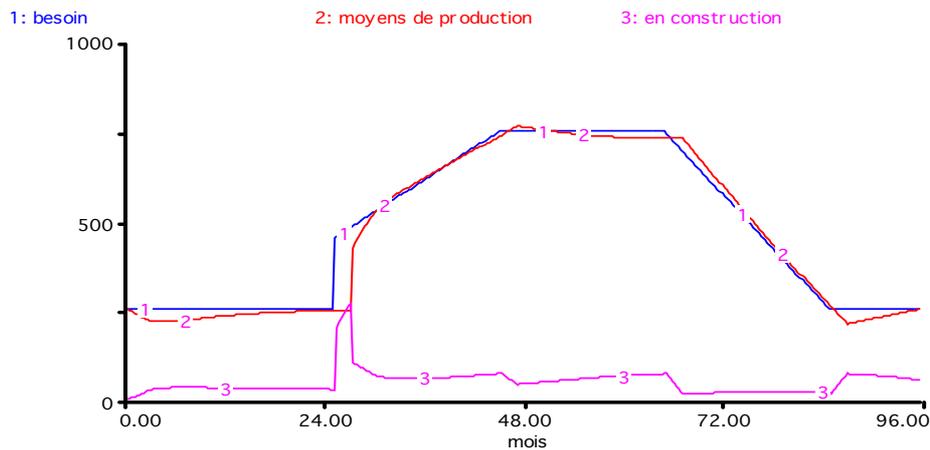


Fig.X.8

Il reste toutefois à essayer de transposer ces concepts propres à la cybernétique, en suggestions pratiques utilisables par des décideurs qui ne sont pas forcément au courant des subtilités de la science des asservissements et des techniques de régulation.

### X - 5 - Transposition des modes de régulation à des concepts décisionnels

On notera que la modélisation a là deux rôles différents. D'une part, elle sert à simuler au mieux ce qui se passe dans la réalité, dans un but de meilleure compréhension, de prospective, de décision raisonnée, etc.. C'est ce qui se passe lorsqu'on modélise une structure d'investissement au moyen de la régulation proportionnelle (§ X - 1 et X - 2). D'autre part, elle peut servir à améliorer le processus décisionnel, en proposant d'autres schémas de décision, d'autres points de prise d'information et/ou d'action, en montrant à travers les simulations correspondantes, l'amélioration possible des résultats. C'est le cas des régulations intégrale et différentielle, dont l'application, si elle est possible, améliore nettement les résultats, c'est-à-dire, l'adéquation entre besoins et réalisations.

La régulation différentielle est assez aisée à transposer en termes décisionnels, et est souvent appliquée en pratique.

Prendre en compte les variations d'un signal revient à anticiper, avec plus ou moins d'acuité, plus ou moins d'optimisme, à partir des données et des événements du passé, les tendances d'évolution future de ce signal, dans notre cas : les besoins. Or ces anticipations, ces prévisions, tout décideur les fait instinctivement avant de prendre la décision d'investir. On peut donc remplacer la notion de dérivée par celle, bien mieux perçue, d'anticipation des besoins.

De plus, cette anticipation ne remplace pas la connaissance de la situation présente, elle s'y ajoute partiellement. On ne compare plus les besoins seuls avec les moyens déjà existants, mais une combinaison (une moyenne arithmétique) de ces besoins avec les besoins anticipés :

Différence = (coefficient \* besoins + (1-coefficient) \* anticipation besoins) – moyens de production existants

(Dans le modèle présenté ici, présent et futur anticipé ont un poids égal (coefficient = 0,5). Ce n'est pas toujours le cas, et le coefficient de pondération peut varier de 0 – seul le futur est pris en compte – à 1 – seul le présent compte -).

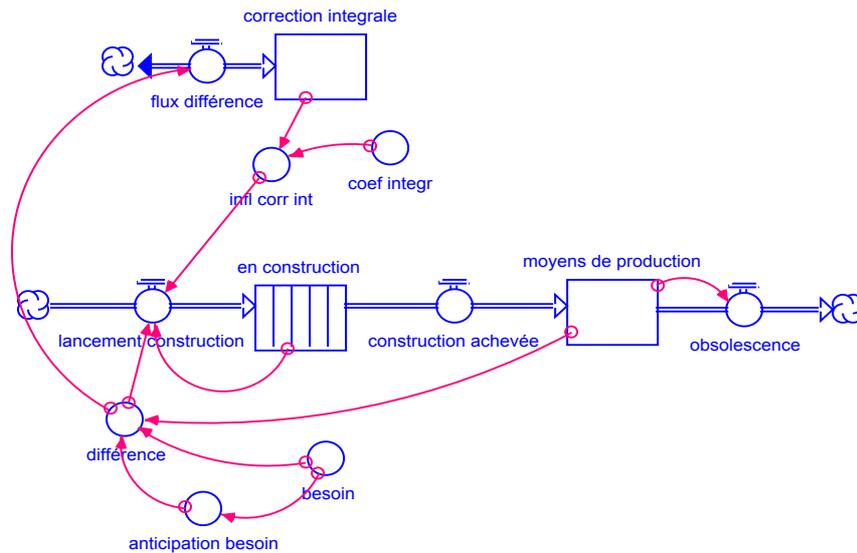


Fig.X.9

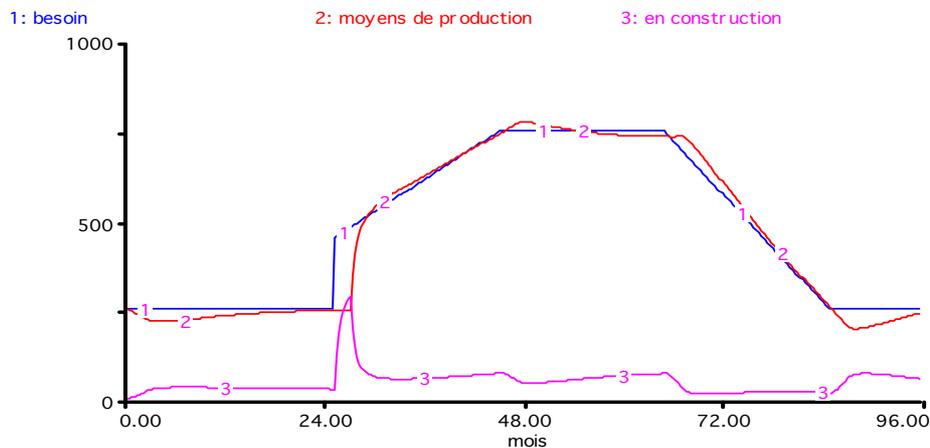


Fig.X.10

Les courbes ci-dessus montrent que la notion de prévision des besoins remplace bien celle, plus abstraite, de dérivée de cette même variable.

Malheureusement, la régulation intégrale ne semble pas pouvoir être exprimée aussi aisément en termes décisionnels. Ce type de correction correspond à la prise en compte et au cumul des différences passées entre besoins et moyens disponibles (les erreurs ou les retards de décision, en quelque sorte, ou encore les difficultés de mise en œuvre). S'il est aisé de connaître ou au moins d'estimer – avec tous les biais que comporte la notion de besoin – cette différence à chaque instant présent, il est certain que la mémoire de cette variable, encore moins son cumul dans le temps, n'existent ni en statistique ni même dans le modèle mental des décideurs.

Nous nous heurtons là à une des difficultés de la Dynamique des Systèmes, à savoir les difficultés de transposition au niveau décisionnel, c'est-à-dire humain, de certaines améliorations de politiques, améliorations qui sont suggérées sur la base d'une comparaison de diverses modélisations. Dans l'exemple que nous venons de traiter, la nette amélioration de résultats obtenue en appliquant une régulation intégrale, se heurte à la difficulté de transposer cette modification - la prise en compte de données inexistantes - à la réalité décisionnelle pratique, et risque donc de rester lettre morte.

Au delà, donc, de suggestions de modifications de politique d'action qui seraient, pour une raison ou une autre, impossibles à réaliser et donc tout de suite rejetées par tout modélisateur réaliste et expérimenté, il nous faut toujours veiller à relier les améliorations découvertes au moyen de la modélisation et qui pourraient être suggérées aux décideurs, à la réalité perceptible par ceux-ci.

## **XI – Une Application Psychosociologique : les Dynamiques de la Motivation**

### **Le modèle MODERE (Motivation - Désir - Résultat)**

Cette dernière partie est consacrée à la présentation du modèle MODERE, modèle basé sur des principes dont certains ont déjà été évoqués dans les chapitres précédents. Il ne s'agit pas, ici, de présenter la totalité du modèle, ni de le décrire dans ses détails. Notre but sera avant tout de montrer comment on peut analyser un système fondamentalement qualitatif, comment commencer une approche de modélisation, comment relier entre elles les différentes théories, que faire du ou des simulateurs ainsi réalisés.

Ce modèle, le plus complexe que nous ayons réalisé à ce jour, mais le plus à même d'évoluer indéfiniment, constituera en quelque sorte une conclusion à notre démarche « systémique » appliquée et, par là même, nous mènera à réitérer quelques unes des idées et des notions déjà présentées au cours des chapitres et des paragraphes qui précèdent.

#### **XI - 1 - De quoi s'agit-il ?**

MODERE résulte d'une rencontre entre les auteurs du présent ouvrage, l'un spécialiste des problèmes de motivation en entreprise, et particulièrement conscient de l'aspect systémique de ces problèmes, l'autre spécialiste en Dynamique des Systèmes et ayant déjà appliqué cette démarche dans le domaine des relations du travail au sein d'une grande société française.

Le sociologue analysait les diverses théories de la motivation sous forme de boucles de rétroaction, le Dynamicien des Systèmes savait qu'on pouvait associer ces boucles et les « dynamiser », en formaliser les relations au sein d'un modèle de simulation où interviendrait explicitement le temps.

#### ***Mais peut-on simuler des comportements humains ?***

Dans la mesure où le processus motivationnel peut être considéré comme un système complexe, c'est-à-dire une structure comportant un grand nombre de variables de natures diverses, interconnectées entre elles et s'influençant mutuellement à travers des relations bouclées, nous pouvons considérer qu'un modèle d'un tel système, tout en restant très réducteur par rapport à la réalité du comportement humain, permet la représentation d'un « complexité dynamique » qui dépasse nos capacités d'analyse et de compréhension globale. Et qui dit représentation adéquate, dit meilleure compréhension. C'est là le but essentiel de l'outil MODERE, destiné à aider à comprendre les complexités des comportements dynamiques de l'être humain, plus particulièrement de l'être humain dans son environnement de travail.

MODERE, dont les versions successives résultent d'une coopération de plusieurs spécialistes : psychosociologue, dynamique des systèmes, informaticien, (cf article 5 auteurs.....), ne constitue ni ne comporte de théorie nouvelle de la motivation. Mais c'est, pensons-nous, le plus complet, peut-être le premier assemblage au sein d'un même modèle, et surtout d'un modèle de simulation dynamique, des principales théories motivationnelles qui toutes, simultanément ou à tour de rôle, ont une importance primordiale, mais dont aucune ne peut, à elle seule, expliquer le comportement humain.

MODERE n'a aucune prétention prospective, ce n'est pas un outil de décision qu'un DRH utiliserait, un oeil fixé sur l'écran de son ordinateur, l'autre oeil dévisageant le candidat à l'embauche - ou au licenciement.

Si l'on se réfère au schéma de la figure III.1.1, MODERE est exclusivement un outil d'aide à une meilleure compréhension globale, dynamique, du plus complexe des systèmes : l'être humain.

Osons ajouter, toutefois, qu'une meilleure compréhension d'un système facilite de meilleures décisions, et que dans le domaine des relations humaines, toute aide dans ce domaine ne peut être que bienvenue.

## XI - 2 - Description du Modèle MODERE

Nous ne décrivons pas en détail les diverses théories motivationnelles, nous limitant à une représentation en causalité circulaire. Le lecteur intéressé pourra se référer aux documents cités dans la bibliographie. Notre propos est de montrer comment le travail de modélisation a commencé, sa progression, comment ont été appliqués les principes de modélisation expliqués au chapitre IV, enfin comment le simulateur MODERE, dans ses diverses étapes, peut être utilisé (mais aussi les erreurs à ne pas commettre).

La présentation de MODERE se fera en deux temps, correspondant d'ailleurs à des étapes successives de développement du modèle. La 1ère étape concernera la motivation centrée autour de la notion de gratification, après quoi nous introduirons des concepts essentiellement cognitifs.

### XI - 2 - 1 - Le problème posé

Il s'agit d'expliquer pourquoi une personne soumise à une opportunité d'action de la part de son environnement (Action Proposée, qui peut être demandée, suggérée, imposée, exigée) va se décider à agir (Action).

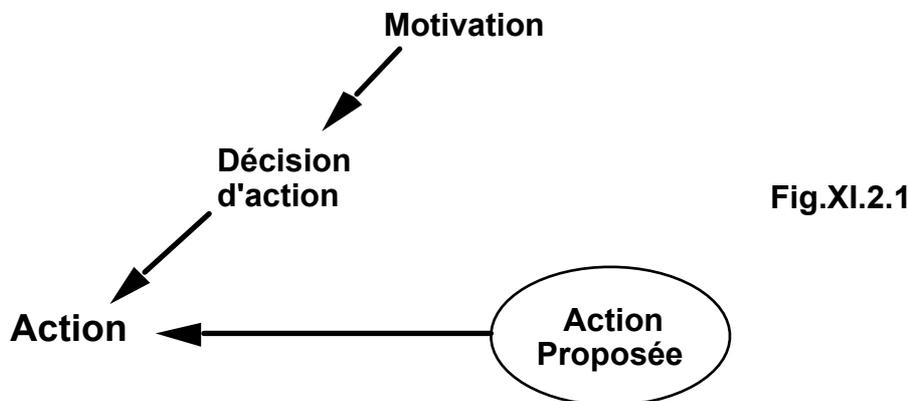


Fig.XI.2.1

En amont de l'Action, la motivation - véritable fourre-tout - est un des éléments favorables à l'action.

Il est bons de rappeler ici qu'en Dynamique des Systèmes, ce n'est pas tant le contenu, la signification des variables qui compte, que leur variation, favorable ou défavorable, faible ou forte, courte ou prolongée. Nous n'essayerons donc pas d'épiloguer sur ce qu'est la motivation, mais plutôt d'analyser les éléments qui la font évoluer favorablement, puisque c'est là un moyen d'aider à la réalisation de l'action.

En aval de la variable Action, nous aurons au moins deux conséquences. Une pour l'environnement - organisme, société, entourage de l'acteur - ayant proposé l'action, et qui bénéficiera des résultats de cette action.

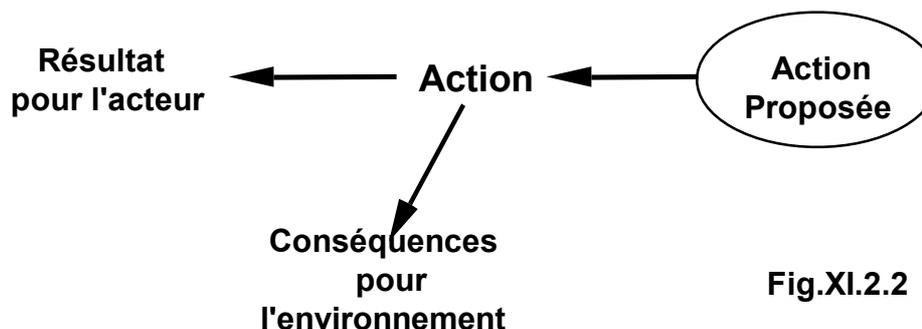


Fig.XI.2.2

L'acteur, quant à lui, constatera le résultat de son action et devra normalement en bénéficier. Ce résultat pourra prendre bien des formes : gratification financière, développement de carrière, compliments, sentiment de satisfaction devant un travail accompli, médaille du travail, congés, etc.. C'est à ce stade que nous faisons intervenir deux notions de base utilisées en Dynamique des Systèmes, et plusieurs fois exposées dans les chapitres IV et VII :

- la notion d'accumulation, concernant certaines variables, et qui donne tout son sens à la notion de dynamique,
- la notion de différence entre bit (objectif) et réalité.

### XI - 2 - 2 - Deux notions fondamentales pour une analyse dynamique

**Accumulation** : le **résultat** de l'action effectuée sera, pour l'acteur, de nature incrémentale, c'est-à-dire que ce résultat s'ajoutera (ou se retranchera éventuellement s'il est négatif) à tous les résultats, à toutes les gratifications précédentes.

Nous appellerons **Réalité** ou **Réalité cumulée** cette variable d'accumulation qui intègre l'ensemble des résultats obtenus jusqu'au moment présent, en réponse aux diverses actions effectuées (par exemple : le salaire qui résulte d'augmentations successives, la position hiérarchique atteinte par progression de carrière, etc.). Mais souvenons nous qu'une variable d'accumulation, si elle ne fait que se remplir, risque d'exploser ou de déborder. Dans le cas présent, comment vider cette variable **Réalité** ?

C'est là qu'intervient un changement dans la nature des variables, changement dont la prise en compte est essentielle à une approche véritablement systémique du problème traité.

Jusqu'à présent, **résultat** et **Réalité** pouvaient être considérées comme des variables objectives, souvent mesurables (rémunération, congés, coefficient hiérarchique). Mais ce n'est pas leur aspect « objectif » qui compte pour l'être humain dont il est question, mais bien plutôt leur aspect « subjectif », c'est-à-dire le sentiment qu'on en a à chaque instant. Ce sentiment est très dépendant de l'effet d'accoutumance, d'obsolescence vis à vis de toute chose. C'est cette accoutumance qui « vide » la variable **Réalité**, pour en faire une **Réalité** subjective, en quelque sorte un état de **Satisfaction** (ou d'Insatisfaction) ressentie.

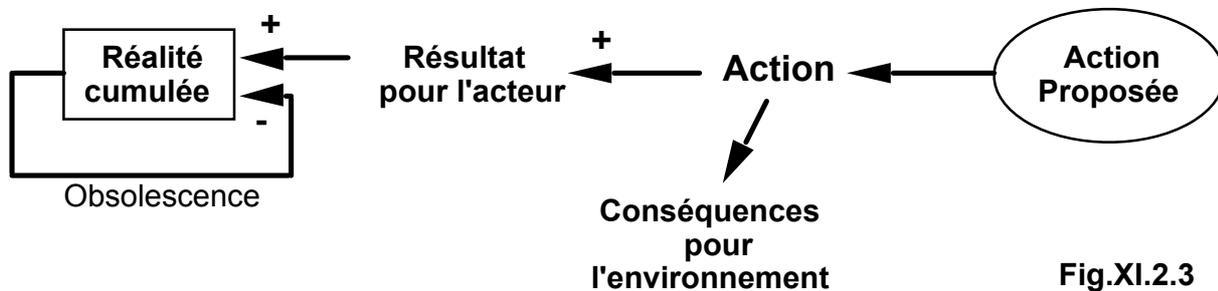


Fig.XI.2.3

**Différence entre but et réalisation** : la notion de **satisfaction** obtenue n'a de sens qu'en comparaison avec les aspirations correspondantes. Celles-ci - ou le désir qu'on ressent d'obtenir plus ou d'atteindre un plus haut niveau de réalisation - constituent le but que l'on compare au cumul des résultats obtenus.



Cette différence entre aspirations et satisfaction obtenue sera un signal essentiel qui guidera le comportement que nous voulons simuler. Il intervient d'abord dans la première théorie motivationnelle, la plus ancienne sans doute, celle de la réalisation des besoins (Maslow, Herzberg) qui, comme toutes les autres théories, peut être résumée et représentée sous la forme d'une ou de plusieurs boucles de rétroaction.

Dans ce premier cas, le signal de différence entre aspirations et satisfaction cumulée agira sur ce que l'on a coutume d'appeler la **Propension à l'action**, qui constitue une des composantes de la motivation, donc de la décision d'action.

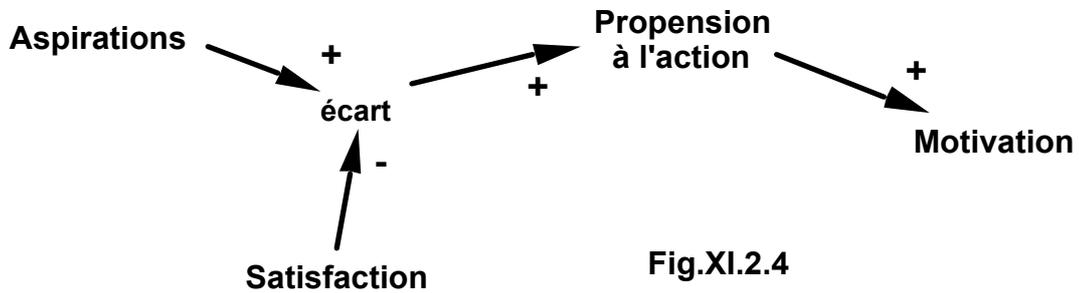


Fig.XI.2.4

### XI - 2 - 3 - La boucle de Satisfaction des Besoins

Nous avons là une première boucle dont il est aisé de vérifier qu'elle a un rôle stabilisateur (boucle homéostatique, de signe négatif) correspondant à la notion de satisfaction des besoins. Cette boucle fait référence pour une part à la théorie S-R (stimulus/réponse) qui a marqué fortement l'école behavioriste des comportements. Cette approche a été toutefois complétée et corrigée par des éléments empruntés à la célèbre théorie des besoins de Maslow.

L'être humain est perçu comme un être de besoin qui n'agit que lorsqu'il est en état de manque, c'est-à-dire lorsque ce qu'il a (**Satisfaction cumulée**) se trouve inférieur à ce qu'il considère comme son état normal de satisfaction (**Aspirations**). L'écart qui en résulte déclenche une disposition naturelle à agir (**Propension à l'action**), disposition qui deviendra un facteur favorable à la motivation.

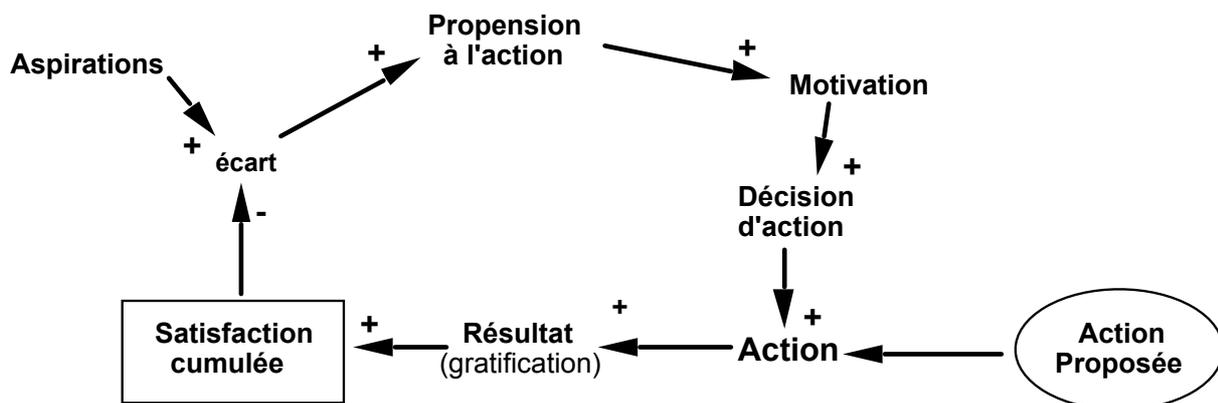


Fig.XI.2.5

Naturellement, cette boucle n'est pas instantanée, elle n'a pas non plus un comportement unique. Il y a des délais entre les diverses variables de cette boucle, par exemple entre action et résultat. Ce dernier, ainsi que la satisfaction cumulée qui en résulte, dépend de l'environnement, de la politique de gratification. C'est à l'utilisateur du modèle de définir le contexte dans lequel se trouve la personne que l'on veut motiver. Dans l'outil final, sous forme de CD-Rom que nous avons réalisé, nous avons donné la possibilité de simuler quelques politiques de gratification, mais les politiques possibles sont innombrables et pourraient être introduites, si besoin est, dans le corps du modèle.

Satisfaire des aspirations, ou des besoins pour parler comme Maslow, serait donc les mobile de toute action et partant le moteur du processus motivationnel.

Chez l'animal, ces besoins sont de nature stéréotypée (faim, soif, sécurité, appartenance, sexualité,...) et presque entièrement pilotés par l'instinct. Chez l'homme en revanche, animal de la « régression de l'instinct » selon le naturaliste Konrad Lorenz, les besoins sont beaucoup plus diversifiés et de nature socio-culturelle. Ils prennent la forme des désirs et renvoient à une analyse spécifique beaucoup plus élaborée.

#### XI - 2 - 4 - La boucle du Désir

Dans le schéma précédent (Fig.XI.2.5), les aspirations donnent l'impression d'être hors de la frontière du système décrit. Il n'en est rien, bien entendu, ces aspirations, ce désir, vont évoluer avec le temps, à mesure que seront plus ou moins satisfaits les besoins décrits par Maslow et Herzberg. Nous serons amenés à introduire la théorie du désir mimétique (René Girard), les notions de stimulation du désir, des attitudes pouvant aller d'un extrême (acteur timoré) à un autre (personne « battante ») en passant par divers degrés intermédiaires.

On se trouve là au cœur de la spécificité humaine, même si on peut supposer que subsiste chez l'homme un noyau minimal de besoins physiologiques. Pour tout le reste, le désir apparaît comme un pur produit de la socio-culture, obtenu et amplifié par effet de Mimésis conformément à la théorie anthropologique de René Girard (dite théorie du désir mimétique). Ainsi se développe une grande diversité de désirs que Maslow considèrera comme autant de besoins et classera selon une hiérarchie qui lui est propre. F.Herzberg, dans une approche complémentaire, mettra en évidence le caractère auto-amplificateur de certains désirs, qu'il appelle facteurs de motivation. En quelque sorte, le désir stimule le désir, ou, comme dit l'adage populaire « plus on en a, plus on en veut » qui résume parfaitement une boucle potentiellement explosive. Voyons comment nous allons modéliser une telle boucle.

Comme nous l'avons fait pour la boucle de satisfaction des besoins, appliquons les deux notions de base rappelées précédemment :

- la différence entre **aspirations** et **satisfaction** cumulée, différence qui génère de la propension à l'action, va agir aussi sur le désir, le stimuler plus ou moins selon le caractère de la personne. Nous verrons un peu plus loin de quelle manière se fait cette stimulation du désir.
- la **satisfaction** cumulée est une variable qui résulte d'une succession de résultats. Si on veut comparer cette satisfaction aux aspirations, il faut que les deux variables soient, dynamiquement parlant, de même nature ; on concevra et représentera donc ces **aspirations** comme le résultat accumulé de variations progressives du désir. Et de même que l'habitude « vide » la satisfaction en l'absence de nouveaux résultats, de même les aspirations deviendront obsolètes si elles ne sont pas renouvelées.

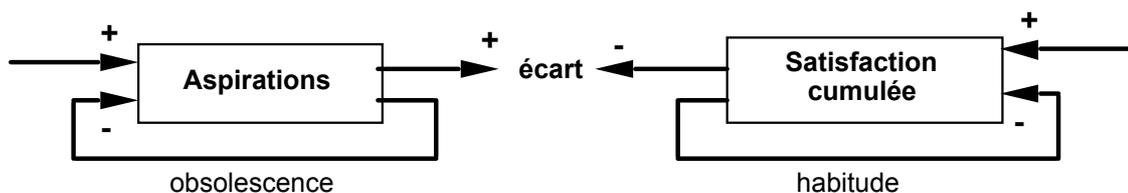
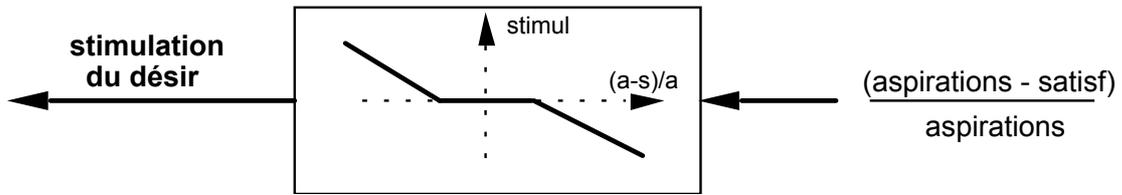


Fig.XI.2.6

Comment se génère, comment évolue ce renouvellement des aspirations, cette stimulation du désir ?

La différence relative entre Aspirations et Satisfaction cumulée stimule le désir à travers une fonction de **progrès espéré** qui a à peu près la forme suivante, que nous allons expliquer :

Plus l'écart entre ce qu'on désire et ce qu'on a, est important, moins on peut espérer de progrès supplémentaire, donc moins cela va stimuler un renouveau, un supplément de désir. Au contraire, si la situation réelle est meilleure qu'on osait espérer, cela stimulera peu à peu un accroissement du désir qui tendra à rattraper, peut-être à dépasser à terme le niveau de satisfaction atteint.

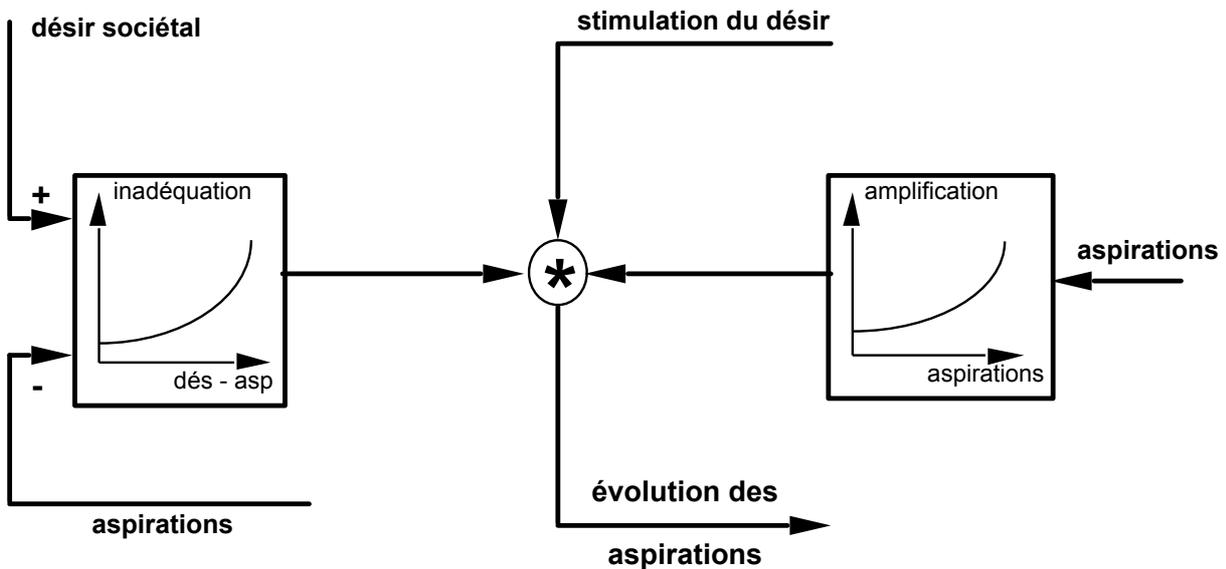


note : par principe, nous préférons réfléchir en variation relative, c'est-à-dire en %, et écrire : (aspirations - satisfaction)/aspirations

**Fig.XI.2.7**

Notons que d'un point de vue dimensionnel, cette stimulation du désir a la dimension d'un flux, donc d'une variation temporelle qui s'intégrera en un niveau (cumul) d'aspiration. Mais auparavant, cette stimulation du désir pourra être modifiée, amplifiée ou au contraire réduite, d'une part par l'influence du désir sociétal, d'autre part par une fonction d'influence représentant en quelque sorte l'attitude du personnage vis à vis de ses aspirations.

Ainsi, dans le schéma qui suit, la forme du graphe d'amplification de la stimulation du désir, correspond à ce qu'on appelle une personnalité « battante ». Cette forme serait toute différente s'il s'agissait, par exemple, de quelqu'un de plus timoré.



**Fig.XI.2.8**

Le schéma de la figure suivante (Fig.XI.2.9) symbolise et résume ce qui vient d'être écrit concernant la boucle du désir mimétique, il montre aussi combien cette boucle peut être complexe...mais la réalité est sans doute encore bien plus complexe que notre représentation.

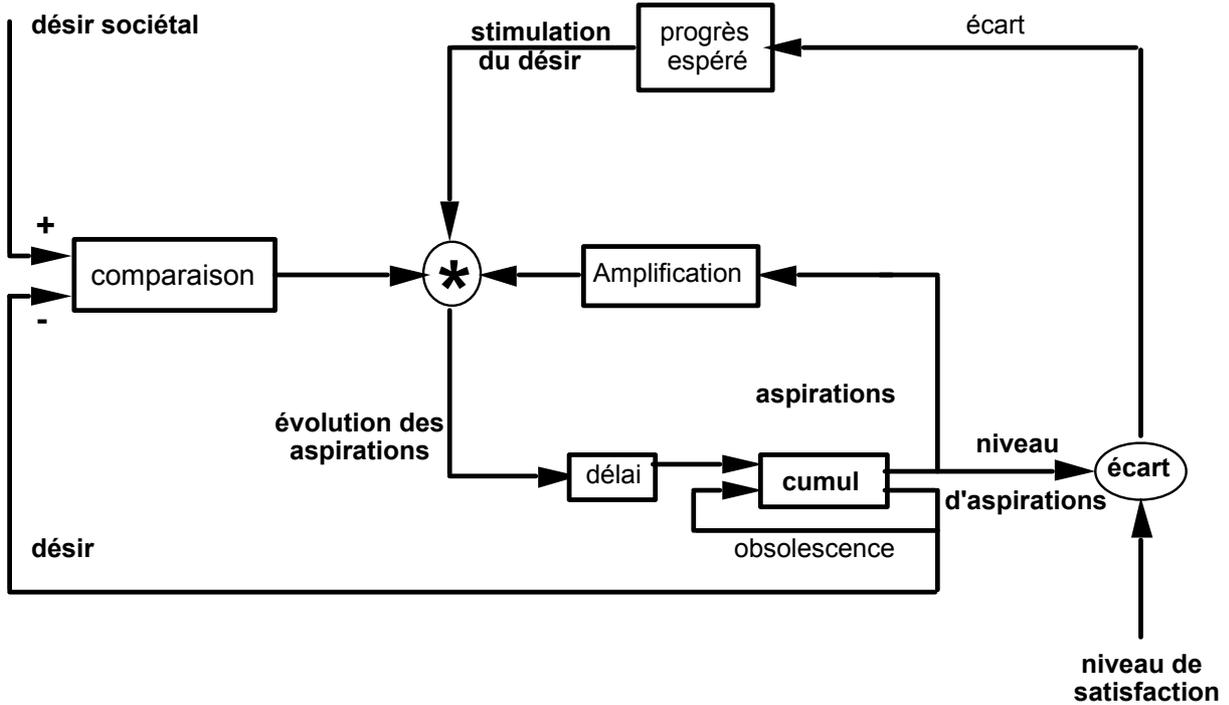


Fig.XI.2.9

Toutefois, le but de ce développement, qui peut paraître complexe, est moins de convaincre de la complexité du modèle, que de montrer l'utilisation répétée des deux concepts fondamentaux plusieurs fois cités, à savoir : notion d'accumulation (variable d'état), écart entre deux variables d'état. Ces concepts seront utilisés pour modéliser toutes les autres théories motivationnelles dont il faut rappeler qu'elles interviennent à un moment ou à un autre dans la motivation humaine, et dont l'ensemble constitue le modèle MODERE.

**XI - 2 - 5 - Les Anticipations**

C'est donc plus brièvement que nous allons décrire la façon dont nous avons modélisé la théorie des anticipations qui correspond à la perception par l'être humain, perçu comme un acteur conscient, maître de son comportement, des conséquences futures possibles, espérées ou promises, de ses actions, en anticipant par la pensée les résultats probables au regard des buts poursuivis.

Le schéma causal d'une telle anticipation est le suivant :

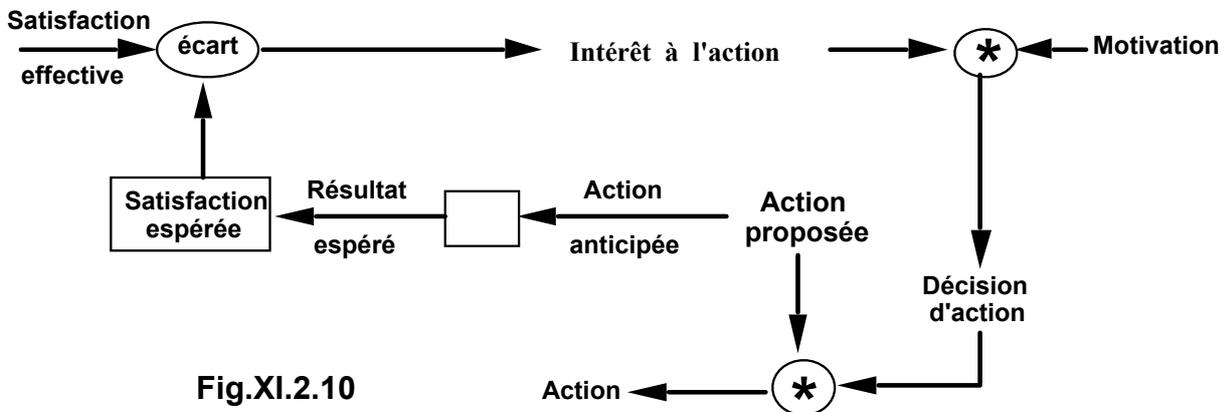


Fig.XI.2.10

La structure des anticipations reproduit en quelque sorte celle du monde réel, en gommant fortement les retards et en ajoutant des distorsions qui sont fonction de l'attitude de la personne concernée, et aussi de l'environnement dans lequel elle se trouve.

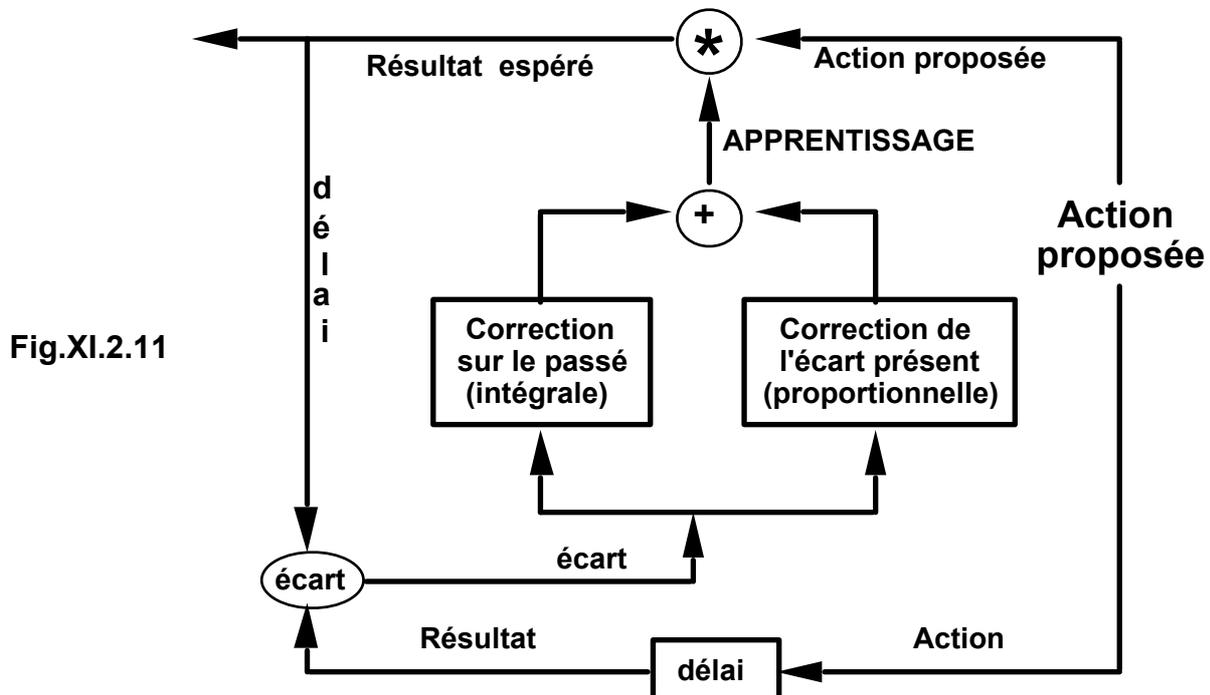
Ainsi, à l'**Action** qui sera effectivement réalisée correspond, dans le monde anticipé, imaginé, une **Action anticipée** qui devrait engendrer un **Résultat espéré** qui se cumulera en une **Satisfaction espérée**. Sans que cela soit toujours conscient, celle-ci est instantanément et à chaque instant comparée à la satisfaction effective (la situation réelle, cumulée), le résultat de cette comparaison générant plus ou moins d'intérêt à l'action qui est proposée. On retrouve la notion essentielle de comparaison, d'écart entre deux variables, ici l'espéré et le réel.

Cet **intérêt** à agir va influencer sur la **décision d'action**, laquelle déterminera l'action effectivement réalisée en réponse à l'action proposée. Nous avons volontairement distingué l'**intérêt à l'action** de la **motivation**, celle-ci étant plus subjective que l'intérêt proprement dit, qui dépend fortement de l'environnement objectif - nature et forme des gratifications possibles - dans lequel se trouve l'acteur. C'est donc la combinaison de l'intérêt à l'action et de la motivation qui commandera la décision d'action.

### XI - 2 - 6 - L'Apprentissage

On aura remarqué, dans le schéma représentant l'anticipation, un carré vide entre l'Action anticipée et le Résultat espéré. Ce carré symbolise une correction qui correspond à l'apprentissage de l'acteur, celui-ci « apprenant » en même temps qu'il agit, et en fonction justement de l'efficacité observée de son action. La gratification espérée constitue en quelque sorte une carotte qui, si elle s'éloigne sans cesse, finira par perdre son attrait. Là aussi, cet apprentissage dépendra de l'acteur concerné, de sa nature plus ou moins confiante, mais aussi de la façon dont l'environnement saura redonner de l'attrait à la carotte espérée.

Sans entrer dans les détails, nous proposons un schéma de principe de la boucle d'apprentissage ; c'est une correction qui fait intervenir à la fois l'écart présent (correction proportionnelle) entre espoir et réalité, et le cumul des écarts passés (correction intégrale) pris plus ou moins en compte selon le caractère, confiant ou pas, de la personne concerné.



**Note :** il est utile de remarquer que, comme pour beaucoup de modèles, toutes ces boucles, ces théories, n'ont pas été introduites dès le début de l'analyse et de la réalisation du modèle. Ce n'est que peu à peu, à mesure de l'avancement du travail, que la prise en compte de ces diverses théories est apparue nécessaire, ou utile, ou les deux. Ainsi, la théorie de l'apprentissage a été introduite lorsque nous avons constaté que, quel que soit l'écart entre espoir et réalité, l'acteur ne corrigeait pas ses espérances. Il y avait là une inadéquation entre le simulateur d'une part, le modèle mental, la logique et l'expérience des auteurs du modèle d'autre part. Cette inadéquation a été corrigée par l'introduction - pas tout de suite évidente - de la boucle de l'apprentissage. Ainsi que nous l'avons déjà dit, c'est souvent le modèle qui nous guide pour corriger des erreurs ou des omissions.



**XI - 2 - 7 - Frustration - Inhibition**

Parmi les théories de la motivation liées à la notion de gratification, la théorie de la frustration - inhibition n'est pas la moins importante (mais pour un Dynamicien des Systèmes, tous les éléments qui risquent à un moment ou à un autre de jouer un rôle dans le comportement d'un système, sont d'égale importance). Elle découle des travaux d'Henri Laborit sur le fonctionnement du cerveau et propose une modélisation du circuit neuronique qu'il a appelé Système d'Inhibition de l'Action (S.I.A.).

L'écart entre **Aspirations** et **Satisfaction** (effective ou espérée ou une combinaison des deux), cet écart qui est à l'origine de la **Propension à l'action**, qui stimule aussi le **Désir**, peut au contraire, s'il devient et reste trop important, créer un état de frustration qui peut se transformer en un état d'abattement, de démobilisation, de dépression...ou de contestation sociale. Ce phénomène d'**Inhibition** - modélisé par une variable d'accumulation - n'est pas instantané et ne survient que si la frustration se prolonge dans le temps. Naturellement, l'Inhibition est démotivante en ce qui concerne la réalisation de l'action proposée.

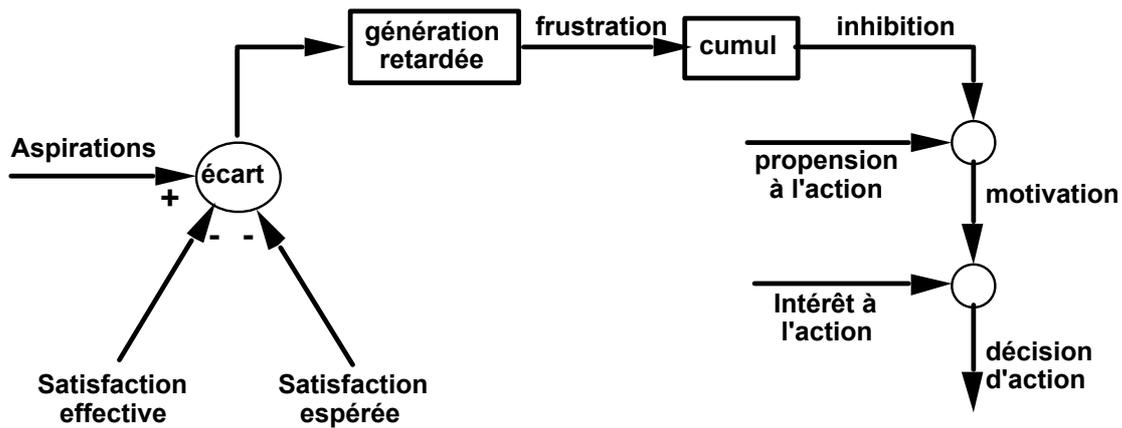


Fig.XI.2.12

**XI - 2 - 8 - Assemblage des théories**

Nous laisserons au lecteur intéressé le soin d'assembler et d'agencer dans un schéma complet, les différentes théories motivationnelles ci-dessus, basées sur la notion de gratification (au sens le plus général du terme).

Le schéma qui suit résume ces cinq théories agencées autour de deux notions de base :

- la Réalisation de l'action proposée,
- l'Adéquation (écart) entre aspirations ou désir, et satisfaction (effective ou espérée).

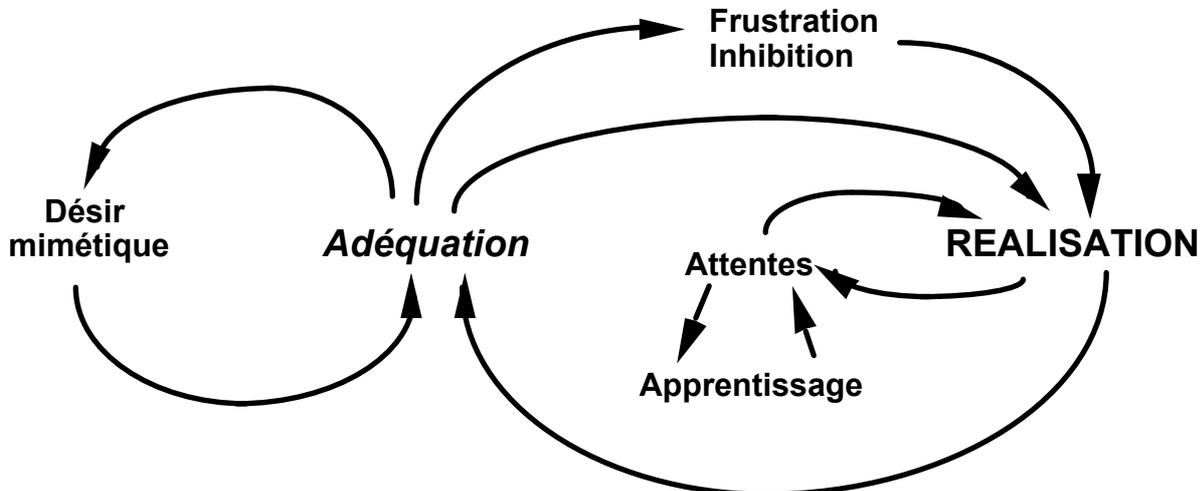


Fig.XI.2.13

Rappelons que ces cinq structures bouclées peuvent agir ensemble ou séparément, simultanément ou à tour de rôle, faiblement ou fortement, selon les circonstances, la situation, le caractère de l'acteur et les modes d'action et de réaction de l'environnement.

Nous laisserons au lecteur intéressé le soin de développer le schéma précédent, compte tenu des divers diagrammes proposés tout au long des pages qui précèdent, et en fonction de son propre modèle mental et de son expérience dans le domaine de la motivation.

### XI - 3 - Utilisation du modèle

Répetons le, MODERE n'est pas destiné à être utilisé en outil opérationnel, lors d'une interview ou d'une évaluation annuelle comme il s'en fait dans presque toutes les sociétés. C'est avant tout un outil de formation au monde complexe des dynamiques motivationnelles, c'est-à-dire des modes de comportement humain, formation au problème des relations du travail, plus généralement à certains aspects des relations humaines.

Cet outil doit être utilisé tranquillement, à tête reposée, avec l'idée d'acquérir peu à peu de l'expérience en fonction des très nombreux scénarios possibles.

Concernant son utilisation, le modèle peut être schématisé ainsi :

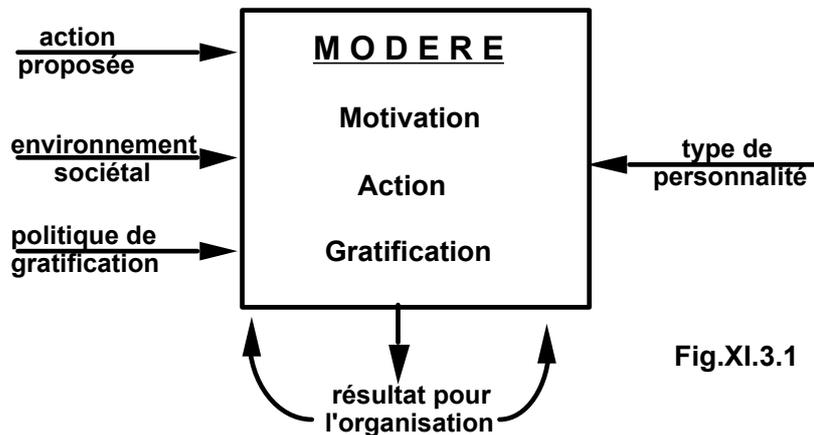


Fig.XI.3.1

Les signaux et paramètres d'entrée sont de deux natures : ceux concernant l'acteur, c'est-à-dire sa personnalité dans le contexte de l'action proposée et de la situation dans laquelle il se trouve, ceux concernant l'environnement, c'est-à-dire le type d'action proposée, les politiques de gratification, l'environnemental sociétal.

Dans un premier temps, ne voulant pas rendre l'utilisation du modèle trop complexe, nous avons limité le nombre de paramètres d'entrée de façon à ne pas dépasser une page d'écran d'ordinateur. Chaque paramètre peut prendre 3 positions (faible, moyen, fort), sauf quelques paramètres temporels qui peuvent varier de 0 à 80 qui est la durée maximale de simulation (celle-ci se fait par pas de une unité de temps, la signification de cette unité dépendant du problème posé et devant donc être pensée et définie par l'utilisateur du modèle). Même avec un nombre actuellement limité de paramètres de personnalité, nous pouvons déjà choisir, simuler et analyser plusieurs millions de scénarios possibles !

MODERE Interactif

### Scénario de simulation

**1. Action proposée**

Forme d'action :  Date d'action :

Niveau de l'action :

**2. Politique de gratification**

Politique initiale :  Niveau initial :

Changement de politique :  Niveau du changement :

Date de changement :  Délai de gratification :

**3. Type de personnalité**

Niveau de pragmatisme :  Niveau de confiance :

Niveau d'aspiration :  Niveau de frustration :

**4. Environnement sociétal**

Niveau :  Date de démarrage :

**5. Sauvegarde**

Nom du scénario (< 8 caractères) :

Menu Principal    Ancien Scénario    Aide    Simulation Continue    Jeu Interactif

Démarrer    Poste de travail    Disquette 3½ (A:)    18:39

Fig.XI.3.2

Afin de rendre MODERE à la fois plus convivial et plus réactif, utilisable en temps réel, nous avons réalisé une version « jeu interactif » (cf Fig. XI.3.3) qui permet périodiquement de réagir à la situation constatée de l'efficacité de l'acteur, en modifiant les paramètres d'environnement tels que les modes et délais de gratification, l'environnement sociétal, l'action proposée. Par contre, les paramètres caractérisant la personnalité de l'acteur ne peuvent pas être modifiés en cours de simulation.

Ce logiciel de simulation permet aussi de comparer les résultats de plusieurs scénarios, en remontant aux causes principales de succès, d'échec, et plus généralement de différence entre les résultats.

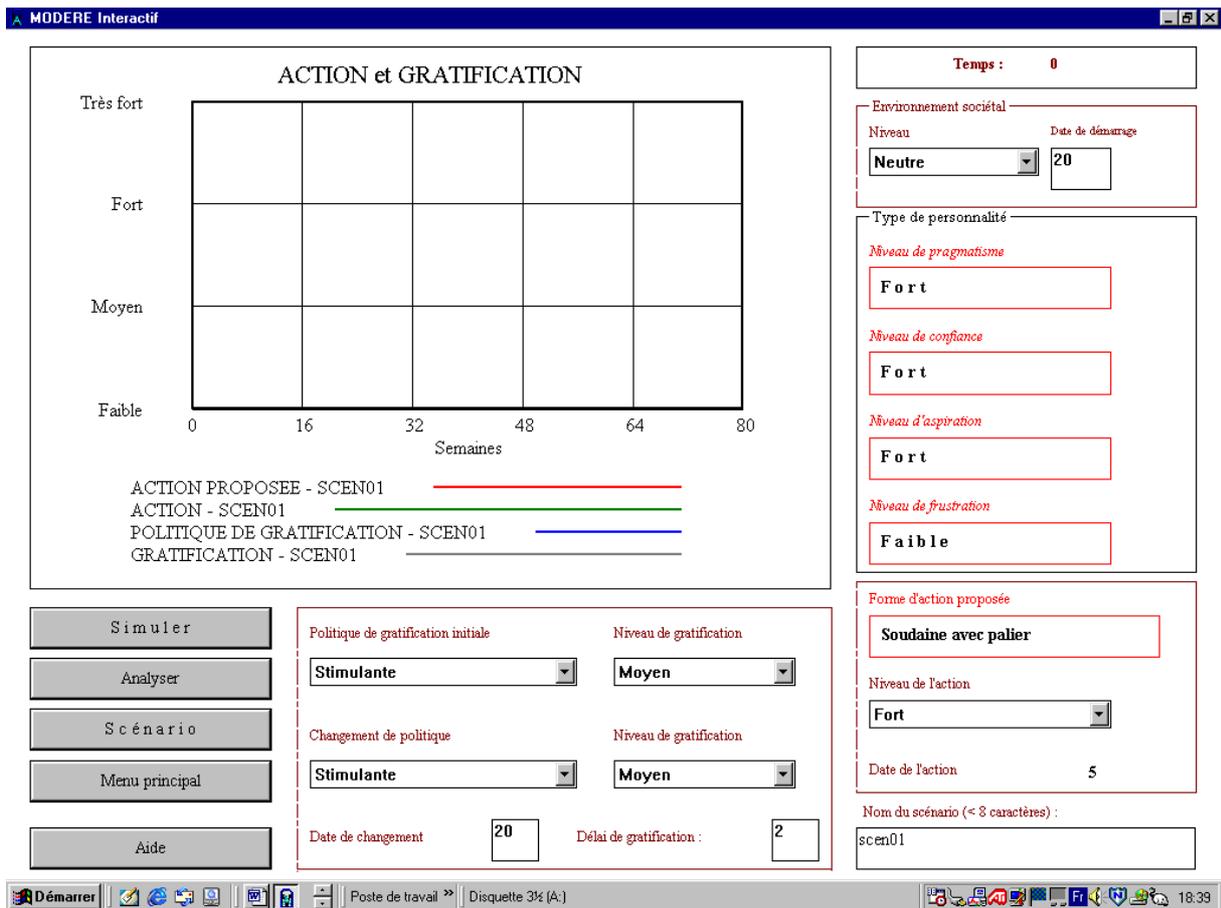


Fig.XI.3.3

Nous terminerons ce chapitre en donnant un exemple d'application de MODERE. Toutefois il nous faut d'abord compléter l'outil auquel manque jusqu'à présent, la prise en compte de certains mécanismes cognitifs essentiels pour analyser, expliquer et comprendre les modes de comportement humains.

#### XI – 4 – Introduction de Processus Cognitifs (cf ... article 5 auteurs.....)

Tel que nous l'avons présenté, MODÉRÉ a pour objet principal, l'analyse de la motivation d'un acteur par rapport à une politique de gratification au sein d'une organisation, plus généralement au sein d'un environnement. On y prend bien en compte certains traits de personnalité pertinents par rapport à la motivation, mais celle-ci est déclenchée et éventuellement modulée par la promesse ou la réalisation d'une gratification. C'est la gratification qui constitue le moteur de la motivation, donc de l'action. Les concepts qui vont suivre introduiront certains mécanismes cognitifs qui peuvent être mis en jeu dans une action. La motivation sera influencée par la représentation que l'acteur peut avoir de l'action elle-même et du contexte dans lequel elle est effectuée.

La personnalité ne se conçoit pas uniquement comme une combinaison stable de traits de personnalité (opinions, attitudes, comportements...) mais également comme un ensemble structuré évolutif. Un tel ensemble peut être défini comme le rôle que s'assigne un individu au sein d'une organisation. L'acteur tente en permanence de maintenir un équilibre entre ce rôle et ses actions, qui se traduit par un travail cognitif de rationalisation.

Trois mécanismes ont donc été ajoutés au modèle initial: la consolidation (théorie de l'engagement), le changement (théorie de la dissonance cognitive) de nos valeurs, opinions ou attitudes (cognitions privées) et l'attitude vis à vis de l'échec et de la réussite (Locus of control).

Le premier (théorie de l'engagement, que nous avons sous-titré moins sérieusement : théorie du pied dans la porte) traduit une tendance chez l'individu qui prend une décision, qui s'engage dans une action, à ne pas remettre en cause cet engagement.

Le second (théorie de la dissonance) renvoi à l'idée que les attentes établies en fonction du rôle que le sujet s'assigne ne sont pas toujours confirmées par ses actions; l'écart entre attentes et action prend alors la forme d'une dissonance cognitive et déclenche une modification des représentations de façon à les rendre conformes à l'action effectuée (effet de rationalisation).

Enfin le troisième prend en compte le fait qu'un acteur peut expliquer ce qui lui arrive (échec ou réussite) par ses capacités, son travail et/ou ses efforts, ou au contraire par la chance et/ou le hasard. Nous avons à faire avec une attitude internalisante dans le premier cas et extériorisante dans le deuxième. Ainsi la personne qui croit avoir un contrôle sur ce qui lui arrive (individu interne) luttera mieux contre les difficultés, que l'acteur qui pense n'avoir pas prise sur les événements (individu externe) et qui aura donc plus tendance à la démotivation.

Le nouveau schéma global de MODERE peut être résumé sous une forme (Fig. XI.4.1) qui comporte, centrées autour de l'ACTION, deux structures qui s'influencent mutuellement :

- la structure de MODÉRÉ telle qu'elle a été décrite jusqu'à présent,
- les processus cognitifs tels que nous allons les décrire dans ce qui suit.

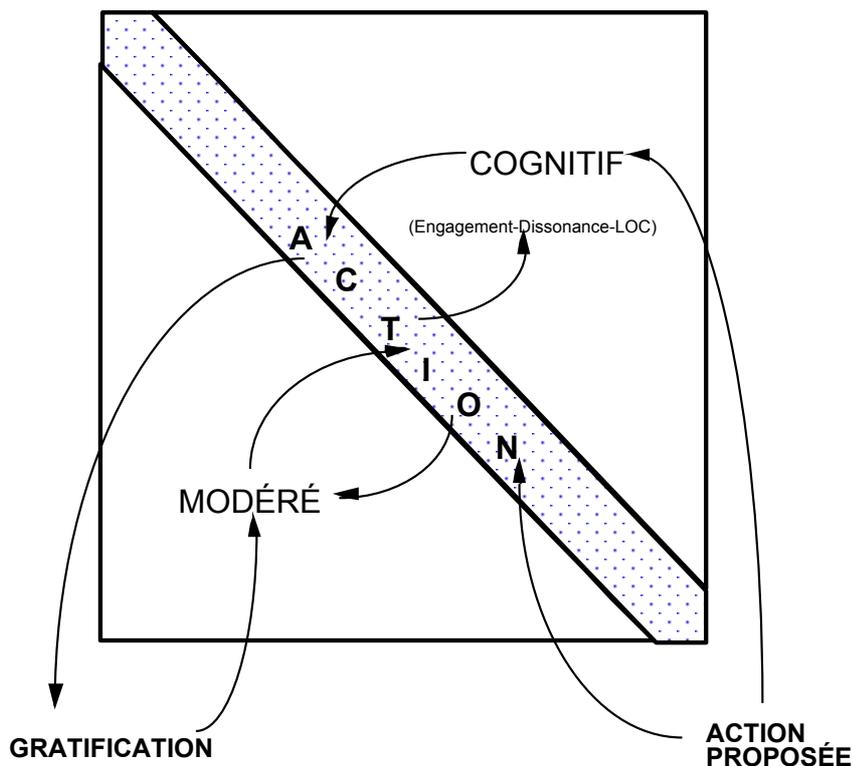


Fig.XI.4.1

#### XI - 4 - 1 - La Théorie de la Rationalisation

Nous allons décrire brièvement les deux constituants de la théorie de la rationalisation (Beauvois et Joule, 2), à savoir la dissonance cognitive et l'engagement, sachant que notre but n'est pas de développer le contenu de chaque théorie, mais d'en expliquer la modélisation.

##### XI - 4 - 1 - 1 - La dissonance cognitive

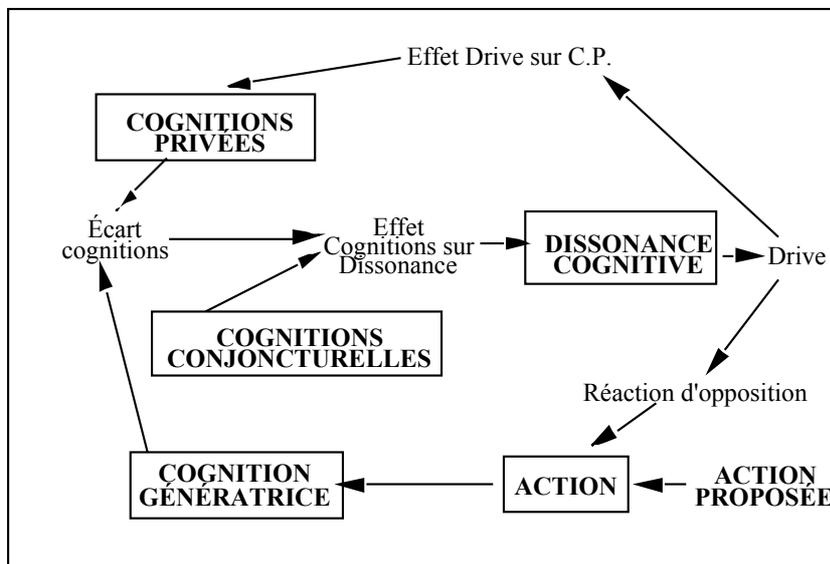
La théorie de la dissonance (Festinger, 1957) renvoie à l'idée que l'homme ne supporte pas que son univers cognitif soit déséquilibré. Pour faire face à des situations qui mettent en présence plusieurs éléments discordants, l'individu réagit naturellement en équilibrant ces éléments de telle façon qu'ils deviennent concordants. On retrouve là les notions déjà décrites, d'une part d'écart, signifiant déséquilibre, par exemple entre désir et réalité, entre anticipations et présent, entre cognitions, d'autre part de force agissante tendant à corriger (mais parfois à renforcer) le déséquilibre. Dans le cas présent, ce processus de correction, qui ne renvoie pas à l'image d'un homme rationnel mais à celle d'un homme rationalisant, a été décomposé en isolant les diverses variables intervenant dans la réduction de la dissonance. Lorsqu'un

individu effectue une action qui va à l'encontre de ses cognitions privées, et que la représentation qu'il a de certains éléments du contexte, comme les justifications qui lui ont été données, ne sont pas suffisantes, alors il risque d'y avoir génération de dissonance.

Les trois éléments clé dont dépend la dissonance sont : la cognition génératrice, les cognitions privées et les cognitions conjoncturelles. Faisons appel ici encore aux deux concepts de base décrits auparavant : la dissonance (force agissante) résulte d'une comparaison (écart) entre la cognition génératrice et les cognitions privées (notions représentatives d'un certain état du système). Si l'écart est important, il y aura apparition du phénomène de rationalisation qui se traduira par une modification dans un sens correcteur (phénomène de rétroaction générant là encore une nouvelle boucle stabilisatrice) des cognitions privées. Cette réaction passe par une nouvelle variable appelée "drive" qui représente une pulsion motivante à réagir pour diminuer la dissonance. Cette réaction peut en fait prendre deux aspects:

1: un effet sur les cognitions privées, tendant à les mettre en phase, en accord avec la cognition génératrice (représentation de l'action effectuée).

2: une réaction d'opposition à l'action proposée (ou suggérée ou exigée) de manière à réduire l'action et à remettre la cognition génératrice plus ou moins en accord avec les cognitions privées.



**Fig.XI.4.2**

Suivant l'individu, les circonstances, l'environnement, on peut voir apparaître l'une ou l'autre de ces réactions, ou même les deux simultanément, et ceci en phase ou en réaction décalée.

En fait, le processus de Dissonance devient plus complexe dès lors que l'on introduit deux boucles supplémentaires passant par les Cognitions Conjoncturelles. Celles-ci sont influencées par trois variables :

- des événements exogènes, indépendants du comportement du modèle.
- la justification de l'action et/ou la gratification qui lui est liée
- la variable "drive" résultant de la dissonance, qui tend à modifier les Cognitions Conjoncturelles pour à nouveau réduire la Dissonance.

Le comportement de ces Cognitions Conjoncturelles modifie donc l'influence de l'écart entre Cognition Génératrice et Cognitions Privées sur la génération de la Dissonance. A ce stade, nous avons quatre boucles de rétroaction pour chaque type de cognition (Privée, Génératrice, Conjoncturelles), ce qui explique déjà en partie la complexité de comportement dans le temps du phénomène de Dissonance. Mais l'analyse se compliquera vite lorsque certaines actions généreront une Cognition Génératrice qui se comparera, simultanément mais différemment, à plusieurs Cognitions Privées.

### XI - 4 - 1 - 2 - L'engagement

La dissonance est un processus qui démarre une fois l'action effectuée, avec pour conséquence un possible changement d'attitude.

La théorie de l'engagement (Kiesler, ....) décrit un processus de consolidation d'attitude qui débute au moment où l'action est proposée. Une personne réalisera une action à priori coûteuse d'autant plus facilement qu'elle a été "engagée" auparavant sur une action semblable mais peu coûteuse (phénomène d'inoculation). Ici le processus de rationalisation (la consolidation d'attitude étant la force agissante) résulte d'une comparaison (écart) entre les Cognitions Privées et la représentation de l'Action Proposée. Si cet écart est faible l'acteur effectuera l'Action. Ce premier pas aura pour conséquence d'éliminer, par un processus de consolidation des Cognitions Privées, l'opposition à une deuxième Action Proposée plus coûteuse.

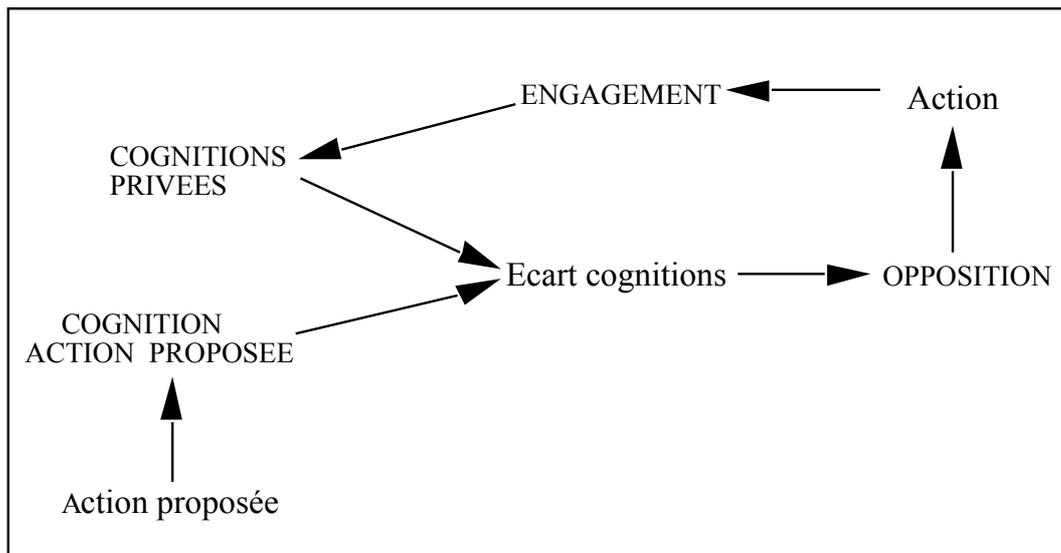


Fig.XI.4.3

### XI - 4 - 1 - 3 - La rationalisation

Le lien principal entre les deux théories que nous venons de présenter succinctement, a été établi à travers la notion de Conformité (initialisation des Cognitions Privées: Beauvois et Joule, ....). Si l'acteur est conforme vis à vis de ce qu'on lui propose, il se retrouvera dans le "secteur engagement". Si son attitude est opposée à ce qu'on lui propose il n'effectuera pas l'action; si malgré tout il s'engage dans une voie qui va à l'encontre de ses cognitions privées, il se retrouvera dans le "secteur dissonance".

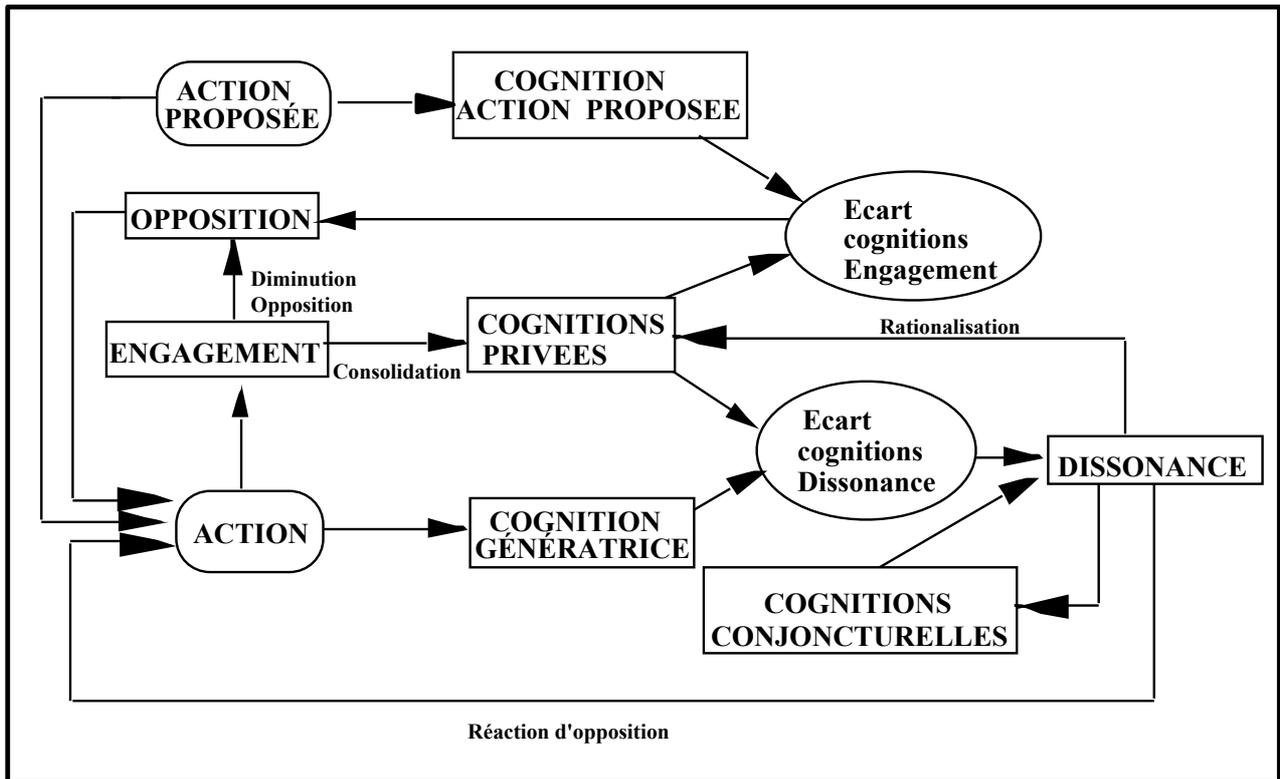


Fig.XI.4.4

#### XI - 4 - 1 - 4 - Le Locus of control (LOC)

Selon Rotter (...) certaines personnes ont tendance à expliquer ce qui leur arrive par la chance ou le hasard, d'autres par leurs capacités ou leurs efforts. Les premiers sont dit externes, les seconds sont appelés internes. Par ailleurs, les théories de l'attribution ont montré que l'homme avait tendance, pour expliquer ce qui arrive à autrui, à préférer les explications renvoyant à la personne plutôt qu'à la situation. Pour N. Dubois (...) ces deux théories représentent les deux versants d'une même norme, appelée norme d'internalité.

Dans un contexte professionnel, cette tendance est primordiale au niveau de la réaction des individus face aux échecs et aux réussites. Un individu interne aura tendance à réagir, à rehausser son niveau d'action en cas d'échec, alors qu'il n'y aura presque aucune réaction, si l'individu est externe. Le LOC est lié à la gratification dont l'obtention est ressentie comme un succès, alors qu'à l'inverse, l'absence de gratification est perçue comme un échec.

Dans la représentation des processus "engagement - dissonance", la variable LOC agit au niveau du "drive". Des recherches sur les liens entre la dissonance et le Locus of Control ont montré que les personnes internes n'hésitaient pas à changer d'attitude en cas de dissonance. L'intensité de leur "drive" est donc lié à leur caractéristique d'internalité.

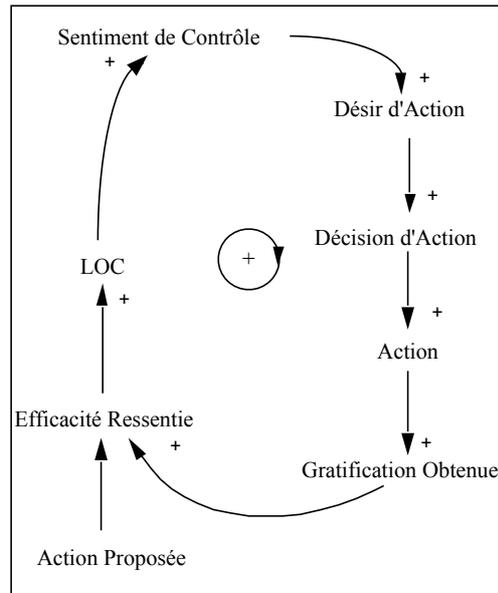


Fig.XI.4.5

#### XI - 4 - 2 - Intégration des Processus Cognitifs à MODERE

La Figure XI.4.6 montre le principe de l'interconnexion réalisée entre MODÉRÉ et le modèle COGNITIF, créant ainsi un nouveau modèle MODERE complet. La partie de gauche rend compte de la motivation de l'acteur en rapport avec la gratification, alors que la partie "cognitive" s'occupe plus particulièrement des représentations de l'acteur quant à l'action proposée, l'action effectuée et la gratification.

Les variables "action", "gratification" et "action proposée" jouent le rôle d'interface entre ces deux parties de MODMIL, et influencent alternativement ou simultanément chacun de leurs processus (par exemple, la gratification augmentera la satisfaction, mais influencera également le niveau du LOC par le sentiment de réussite qu'elle suggère).

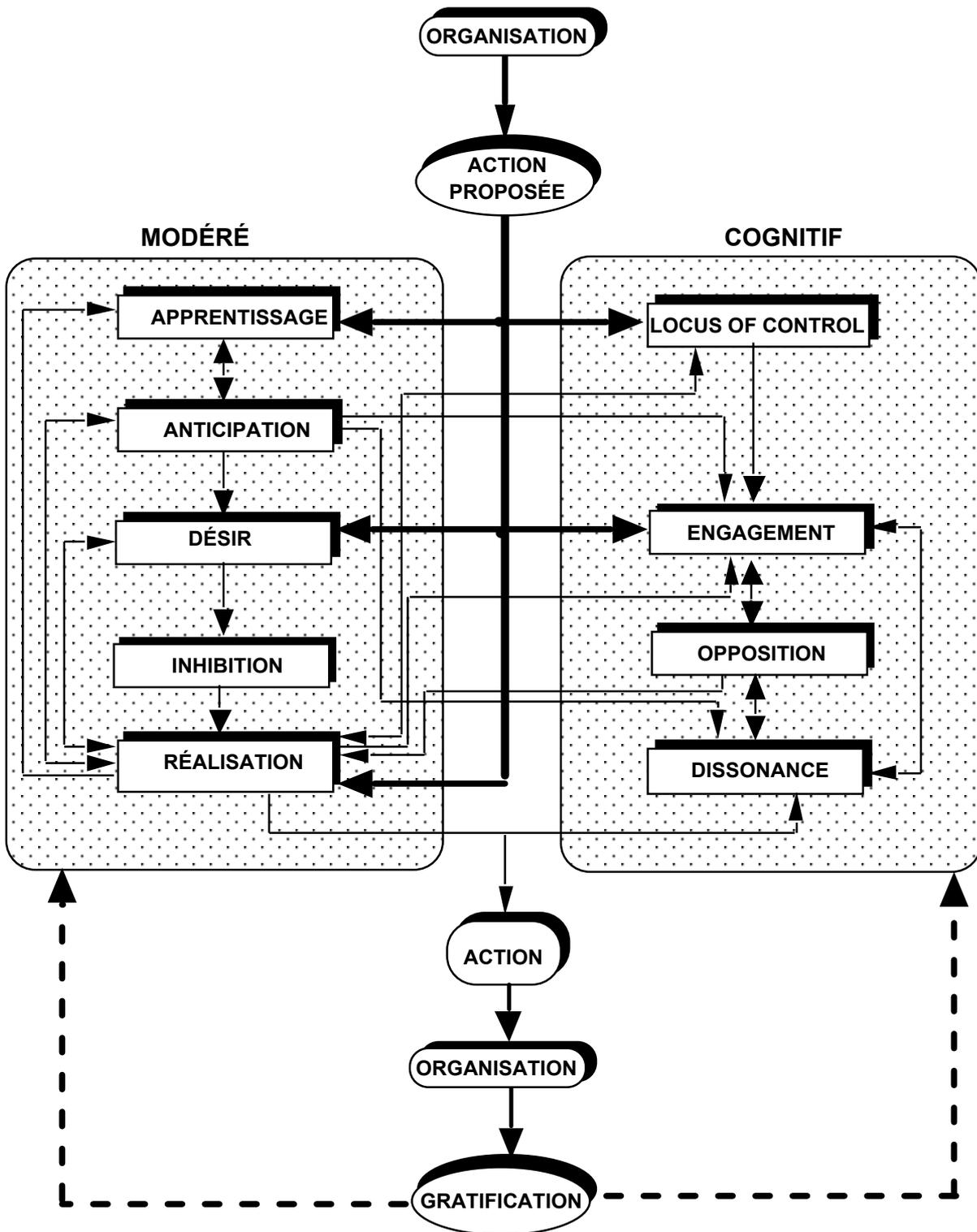


Fig.XI.4.6 : Le modèle MODERE

Le schéma précédent présente presque toutes les grandes théories incorporées dans le modèle MODERE. Il manque une description de la sanction, complémentaire de la gratification, et qui nous a amené à introduire et modéliser la théorie de l'Appartenance. Nous ne développerons pas cette théorie dans le cadre de cette présentation, celle-ci étant déjà bien complexe telle quelle. La version finale, diffusée, de MODERE, prend naturellement en compte la théorie de l'appartenance, ainsi que toutes celles présentées dans ce chapitre.

## **XI - 5 - Un Exemple d'Utilisation de MODERE**

Ce modèle a été utilisé sous diverses formes, dont les dernières versions sur support CD-Rom, avec analyse de cas, explication animée des théories, possibilité de définition de scénarios partiels ou complets, et naturellement, simulation et analyse de tous ces scénarios. Les scénarios analysés ont été choisis et développés de façon à avoir un sens pour l'auditoire, le lecteur ou l'utilisateur du modèle.

Nous avons analysé et simulé les réactions à des envois soudains en mission de plus ou moins longue durée, des développements de carrière ne correspondant pas toujours aux aspirations des intéressés, des réactions caractérielles, etc.. En particulier, le modèle a été utilisé pour analyser l'impact de divers modes de rémunération au sein d'une entreprise, sachant que la rémunération est considérée comme l'un des enjeux pertinents pour soutenir une politique de motivation du personnel

L'exemple que nous développerons ici ne concerne pas l'environnement de travail, mais un cas général pouvant nous concerner tous plus ou moins directement : la politique de sevrage d'un fumeur. Ce cas, mis au point à l'occasion d'une coopération avec le personnel infirmier d'un hôpital, nous permettra d'illustrer quelques aspects de la complexité de mise au point d'une telle politique, et devrait montrer comment MODERE peut aider à mieux appréhender l'effet des relations entre médecin et patient, comme, plus généralement, il peut aider à mieux comprendre et gérer les relations entre deux personnes, dans un cadre professionnel, mais aussi personnel.

### **XI - 5 - 1 - Politique de Sevrage d'un Fumeur - Présentation du Cas**

Mr X a des problèmes cardio-vasculaires. Sans que la situation soit vraiment grave pour le moment, vous pressentez que des complications dues à sa mauvaise circulation pourront survenir, si votre patient ne s'astreint pas à une hygiène de vie rigoureuse.

Mr X est ce que l'on appelle un bon vivant. Il aime la bonne chair, arrosée d'un bon vin et, plus inquiétant encore, il fume deux paquets de cigarettes par jour.

Jusqu'à présent, les politiques de gratification concernaient le salaire, une médaille, l'intérêt au travail, des compliments... Dans le cas présent, la politique de gratification prendra la forme des justifications apportées à un fumeur pour qu'il cesse de fumer. En cas de succès, Mr X. augmentera fortement son capital santé. La gratification peut donc être, dans ce cas, assimilée au capital santé.

L'action proposée « s'arrêter de fumer » est une action de forte intensité (lorsqu'on fume plus d'un paquet de cigarettes par jour, il n'est pas du tout évident de s'arrêter, surtout lorsque la décision n'est pas personnelle). Dans sa forme opérationnelle actuelle (qui n'est pas la seule possible), MODERE permet de décrire et de simuler trois politiques de gratification: bureaucratique (quelle que soit l'action, la gratification correspondante sera nulle), traditionnelle (gratification proportionnelle à l'action effectuée) et stimulante (politique de bonus, obtenu seulement si l'action a dépassé un certain seuil). Nous optons, dans cette simulation, pour une politique stimulante. En clair, il faudra que l'acteur dépasse un certain seuil d'action pour obtenir la gratification (augmenter son capital santé).

Mr X n'est pas très heureux de s'engager dans cette action. Il est plutôt *timoré*. Il est *confiant* (ici, la confiance signifie qu'il ne tient pas compte du résultat immédiat. Ne pas réussir tout de suite à s'arrêter de fumer n'infléchira pas sa confiance dans ce que lui a promis le corps médical). Il *est moyennement frustrable* : s'il ne parvient pas à s'arrêter de fumer (gratification non obtenue), et que son désir de le faire reste important, il sera frustré. Il est pragmatique (j'attend quelques mois avant de me dire que j'ai effectivement réussi).

L'enjeu est important, la politique de gratification est forte, le délai de gratification est assez important: il faut un certain temps avant de considérer que l'action a été efficace (ce n'est pas dès le premier jour de sevrage que X. pourra dire qu'il a réussi à s'arrêter de fumer).

On agit sur le désir sociétal en décidant de rendre l'enjeu encore plus important. Les justifications sont fortes, et en plus vous donnez au patient une documentation « antitabac », où sont décrits les méfaits du tabac (désir sociétal moyen).

La simulation montre un échec de cette politique. Le patient réussit à s'arrêter pendant quelque temps, puis son action chute et l'échec semble être définitif.

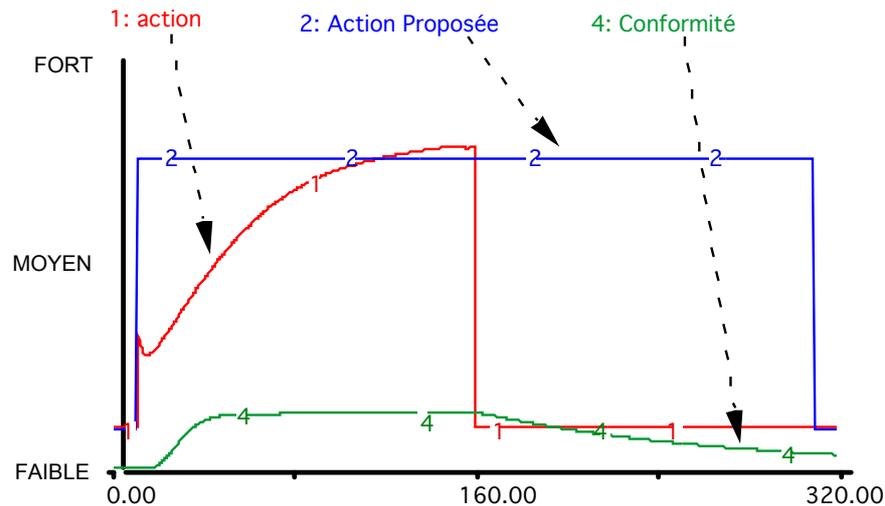


Fig.XI.5.1

### XI - 5 - 2 - Utilisation des variables cognitives de MODERE

Nous venons de voir l'importance d'une politique de gratifications. L'acteur est néanmoins un être qui réagit à son environnement, qui interprète les actions qu'il décide de mener. Ce sont ces interprétations que nous allons maintenant prendre en compte.

#### a - Paramétrage du Simulateur

A priori, Mr X. n'est pas *conforme* avec l'action de s'arrêter de fumer, action de forte intensité car X. est gros fumeur. Vous lui donnez deux rendez-vous espacés de 5 mois (2\*150 unités de temps).

La gratification prendra la forme de justifications suggérées pour que le sujet cesse sa consommation de tabac. Dans le premier cas, « justification forte » pour les deux rendez-vous et dans le second, « justification faible » pour le premier rendez-vous et forte pour le second: « Si je parviens à m'arrêter mon bénéfice santé est grand dans le premier cas et moins important dans le second ».

#### b - les simulations

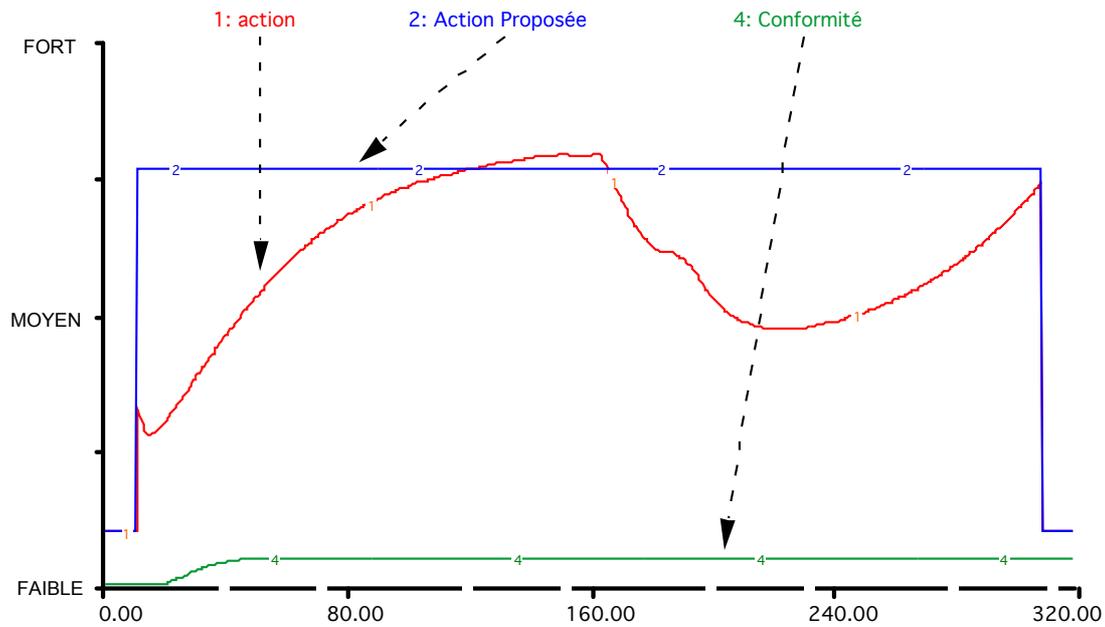
- justification forte : **Vous décidez de lui faire peur: «Si vous ne vous arrêtez pas de fumer immédiatement vos jours sont en danger. Vous risquez, d'ici 10 ans, de faire un infarctus qui pourra vous être fatal ».**

Dans ce premier cas, vous donnez de fortes justifications (menaces concernant sa santé) au patient pour faire une action qui va à l'encontre de sa nature.

La simulation correspondante montre que le patient réussit à s'arrêter de fumer pendant les premiers mois (du temps 10 au temps 160). Par contre la seconde période est plus chaotique : son action chute, puis remonte à la fin de la simulation.

On note que pendant toute la période de simulation la conformité n'évolue pas. Mr X. reste donc non conforme vis à vis de l'action « s'arrêter de fumer ».

Dans la réalité, une réaction comme celle montrée sur la figure XI.5.2 (chute puis reprise) n'est pas satisfaisante et devrait être évitée. Si les tendances que montre la courbe d'action (arrêter de fumer) ont toutes les chances d'être vérifiées, le niveau bas atteint par la courbe d'action n'est pas garanti. Or si la tendance à la baisse s'accroît un peu, l'action peut ne plus pouvoir remonter, on se remet définitivement à fumer (l'expérience montre que ce risque est grand). La politique du « mieux » après le « creux de la vague » correspond à un certain adage populaire, mais est rarement accepté et appliqué par les décideurs.



**Fig.XI.5.2**

L'analyse des autres variables du modèle aide à expliquer cette évolution. Ici aussi, la propension à l'action tombe : la satisfaction obtenue lors de la première période a dépassé le désir d'arrêter de fumer. Comme le sujet n'a fait aucun travail sur lui-même (pas de rationalisation de l'action menée, peu de dissonance), son action n'a pas réellement de sens pour lui, si ce n'est de suivre ce que son interlocuteur lui a dit de faire. En fait, sa satisfaction obtenue n'est pas suffisante. L'action est guidé par un enjeu impersonnel: il s'arrête de fumer parce qu'on lui a dit de le faire. Dans le temps cette raison ne suffit plus. Il est toujours non conforme vis à vis de l'action « s'arrêter de fumer ».

Justification faible : **Vous n'inquiétez pas trop Mr X, tout en lui conseillant de réduire sa consommation de cigarettes et, s'il le peut, de s'arrêter définitivement de fumer: «Pour l'instant vos problèmes ne sont pas trop graves. Néanmoins je vous conseille de réduire votre consommation de cigarettes, et si vous le pouvez d'arrêter totalement »**. Dans cette configuration, vous lui laissez une part d'initiative personnelle plus importante.

La seconde simulation est tout autre. L'acteur a beaucoup de difficulté à mener sa première action mais fini, à la fin de la seconde période, par réussir. En fait, Mr X. a fait un important travail sur lui-même : les cognitions évoluent vers la conformité. Le combat est plus difficile mais le travail cognitif est important. Il commence probablement à se trouver lui-même des raisons à son action. Grâce à un processus d'engagement cognitif, on a réussi à faire d'un fumeur un non fumeur (il devient conforme vis à vis de l'action « s'arrêter de fumer », il est même peut-être prêt à recevoir des justifications fortes qui accélèreraient le processus).

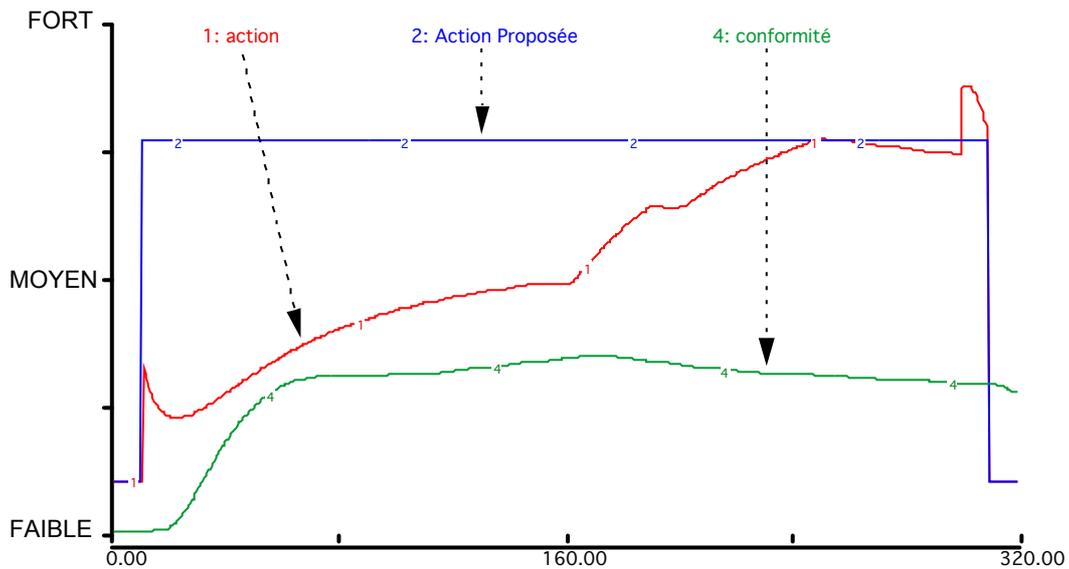


Fig.XI.5.3

- soumission à l'autorité et internalité

Dans les simulations précédentes le comportement de soumission à l'autorité du corps médical (l'effet « blouse blanche » a fait l'objet de la célèbre expérience de Milgram, illustrée dans le film de Costa-Gravas : « I comme Icare ») était garanti lors des deux actions (engagement non conforme). Ainsi l'acteur effectuait une action allant à priori à l'encontre de son opinion: « je m'arrête de fumer parce que c'est dangereux pour ma santé ». Cette idée naît naturellement dans son esprit parce qu'il est certain que son interlocuteur est détenteur du savoir. Si on (et ici le « on » n'est pas n'importe qui puisque qu'il porte une blouse blanche) lui dit « c'est dangereux » c'est forcément exact.

Dans ce nouveau scénario, nous avons retiré la soumission à l'autorité (pas de second rendez-vous) afin de laisser l'acteur faire à sa guise lors de la seconde phase.

Voyons ce qui se passe alors dans nos deux contextes de justification (forte et faible), avec un sujet moyennement puis fortement « interne » (Locus of Control moyen puis fort)

#### a. LOC moyen

Les graphes qui suivent montrent qu'aucune des politiques de sevrage ne fonctionne.

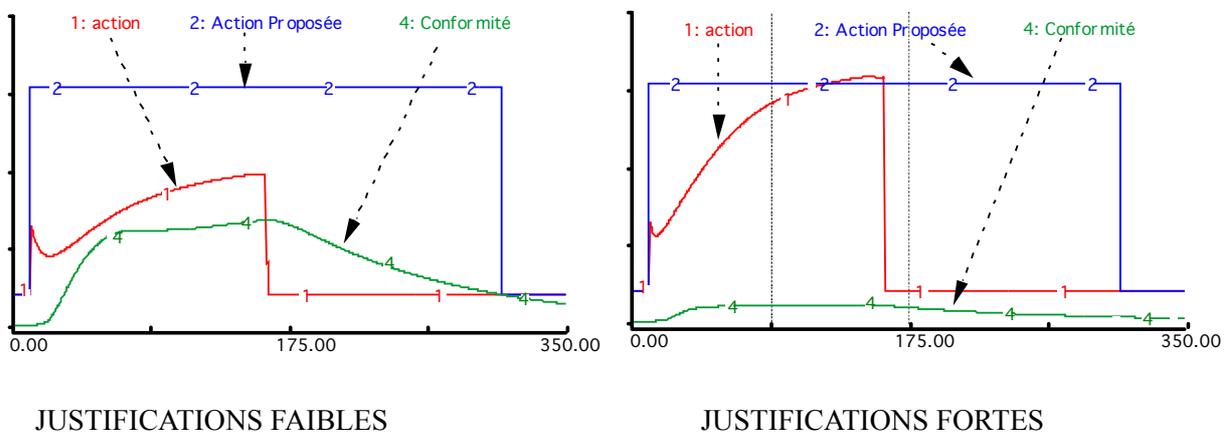
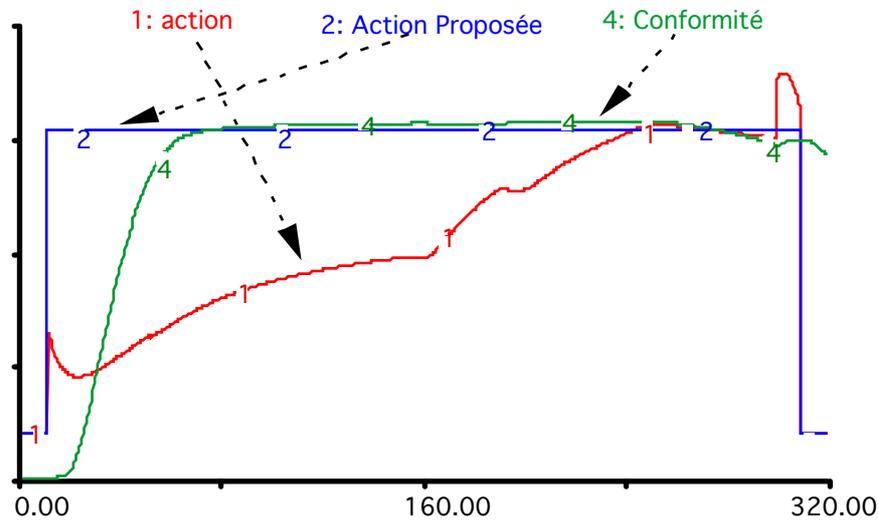


Fig.XI.5.4

b. LOC fort



JUSTIFICATIONS FAIBLES

Fig.XI.5.5

Les résultats montrent que seul le sujet à qui l'on fournit des justifications faibles pour son action, s'arrête effectivement de fumer. Le fait d'avoir à faire à un patient très interne (donc persuadé qu'il est capable d'agir sur lui-même) engendre une très grande réactivité dans une situation de dissonance comme c'est le cas dans la condition « justification faible ». Dans la condition « justification forte » le patient ne rationalise pas son action et finit par se désengager totalement : il remet en question l'autorité médicale.

Ce petit exemple montre bien l'importance du phénomène de rationalisation. Il est nécessaire que le patient fasse un travail dont il pense être l'initiateur. La dissonance a facilité son travail cognitif consistant à devenir non fumeur avec une logique et une dynamique qui lui sont propres.

## XI – 6 – Conclusion

Nous avons voulu montrer la possibilité d'application de la Dynamique des Systèmes, démarche que nous appelons aussi la « Systémique de l'Ingénieur », à un domaine purement qualitatif, aux données et aux variables floues. Notre but a été d'une part de montrer comment aborder une telle étude, comment réaliser, pas à pas, un tel modèle, d'autre part comment l'utiliser. Nous espérons avoir mis en évidence les possibilités et la plasticité du modèle MODERE, sa capacité à simuler les réactions d'une grande diversité de personnalités face à une variété de situations.

Dans l'application que nous avons développée dans ce texte, nous n'avons fait jouer qu'une faible partie du modèle, laissant de côté, par exemple, l'inhibition qui intervient de manière décisive dans des situations de frustration prolongée, la prise en compte de personnalités « rêveuse » pour qui les anticipations comptent plus que la réalité, l'appartenance qui explique l'effet et les conséquences des sanctions, etc..

Quelles que soient les applications, le modèle MODERE – comme tout modèle – ne peut évidemment espérer apporter à lui seul la solution au problème de la motivation humaine. Le phénomène est trop complexe pour espérer avec un modèle, aussi bien conçu soit-il, représenter toutes les subtilités du réel.

Néanmoins, grâce à sa prise en compte de l'imbrication des différents facteurs et à sa capacité de représenter la dynamique des phénomènes, MODERE apparaît aujourd'hui comme un des rares outils permettant :

- d'analyser et comprendre les **évolutions** des comportements humains, enrichissant ainsi notre connaissance du sujet,
- d'analyser des comportements inattendus ou difficiles à comprendre,
- de prévoir des réactions motivationnelles futures, possibles ou probables,
- de simuler des actions à mettre en œuvre et de juger - sans risque - de leur efficacité, suggérant des remèdes qui, comme tous les remèdes, ne sont efficaces que s'ils sont correctement programmés dans le temps.

MODERE ne nous dispense pas du devoir d'intelligence mais nous incite, au contraire, à devenir encore plus clairvoyant.

### *Références de la partie XI*

(1) Adamo J. M. et Karsky M., *Application de la dynamique des systèmes et de la logique floue à la modélisation d'un problème de postés en raffinerie*. Actes du congrès de l'AFCET, Modélisation et maîtrise des systèmes techniques, économiques et sociaux, Editions Hommes techniques, tome 2, p. 479, novembre 1977.

(2) Beauvois J. L. et Joule R., *Soumission et idéologies*, PUF, 1981.

(3) Caverni J.-P., Bastien C., Mendelsohn P. et Tiberghien G. *Psychologie cognitive : modèles et méthodes*. PUG, Grenoble, 1988.

(4) Doize W., Deschamps J.-C., Mugny G., *Psychologie sociale expérimentale*, Paris, Colin, 1978.

(5) Donnadiou G et Isnard A., *Pour une approche systémique de la motivation*, Revue internationale de systémique, vol 4, n°3, 1990.

(6) Donnadiou G., *Du salaire à la rétribution*, Editions liaisons, 1991.

(7) Donnadiou G. et Karsky M. : *The Dynamics of Behavior and Motivation*, Proceedings of the 1990 International System Dynamics Conference, Boston 1990.

(8) Donnadiou G. et Karsky M. : *Les Dynamiques de la Motivation : MODÉRÉ*, Document Entreprise et Personnel, Décembre 1991.

(9) Donnadiou G. et Karsky M. : *Les Dynamiques de la Motivation*, Revue Internationale de Systémique, Vol 7, N° 1, 1993.

(10) Dubois N., *La psychologie du contrôle*, PUG, 1987

(11) Festinger L., *A theory of cognitive dissonance*, Evanston, Illinois, Row, Peterson, 1957.

(12) Francès R., "La motivation au travail" dans le *Traité de psychologie du travail*, C. Lévy-Leboyer et J.-C. Spérando, PUF, 1987.

(13) Girard R., *Des choses cachées depuis la fondation du monde*, Paris, Grasset.

- (14) Herzberg F., Mausner B., Snyderman B., *The motivation to work*, New York, Wiley, 1959.
- (15) Herzberg F. *Le travail et la nature de l'homme*, Paris, Entreprise moderne d'Édition.
- (16) Jodelet D. *les représentations sociales*, PUF, 1989.
- (17) Karsky M et Donnadiou G.: *Tentative de Modélisation de la Motivation*, Revue Personnel N° 347 Janvier 1994.
- (18) Karsky M. et Lorenter A., *Enriching the job content in an oil refinery: a Systems Dynamics Approach*, IEEE Conference on Systems and Cybernetics, Boston, 1980.
- (19) Kiesler C. A., *The psychology of commitment, experiments linking behavior to belief*, New York, Academic Press, 1971.
- (20) Laborit H, *L'inhibition de l'action*, Masson, Paris, 1979.
- (21) Le Moigne P., *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris, 1990.
- (22) Lévy-Leboyer C., *La crise des motivations*, Paris, PUF, 1984.
- (23) Lorenter A., *Application de la dynamique des systèmes aux problèmes de comportement au travail*, 5è journée Dynamique des Systèmes de l'AFCEP. Université de l'Etat de Mons, 1979.
- (24) Maslow A. H., *Motivation and personality*, New York, Harper and Row, 1954.
- (25) Michel S., *Peut-on gérer les motivations ?* PUF, Paris, 1989.
- (26) Michel S., Motivation, satisfaction et implication, in AUBERT N. et al, *Management : aspects humains et organisationnels*, PUF "fondamental", Paris, 1991 :173-202.
- (27) Nuttin J., *Théorie de la motivation humaine*, Paris, PUF, 1985.
- (28) Porter L. W., Lawler E. E., *Managerial attitudes and performance*, Homewood, Dorsey Press, 1968.
- (29) Reuchlin M. La notion de motivation et les caractères propres des motivations humaines. In Reuchlin M., *Psychologie*, PUF, Paris, 1990 : 399-400 et 448-475.
- (30) Rotter J.B. *Generalized expentencies for internal versus external control of reinforcement*, Psychological monographs, 80, n°1, 1966
- (31) Thiétart R. A., *La dynamique de l'homme au travail. Une nouvelle approche de système*. Paris, Les éditions d'Organisation, 1977.
- (32) Tiberghien G., Modèles de l'activité cognitive. In Caverni et al. *Psychologie cognitive : modèles et méthodes*. PUG, Grenoble, 1988 : 7-10.
- (33) Vroom V. H., *Ego-involvement, job satisfaction and job performance*, Personnel Psychologie, 1962, 15, 159-177.
- (34) Vroom V. H., *Work and motivation* New-York

## CONCLUSION GENERALE

A qui s'adresse cette démarche, cette "Systémique de l'Ingénieur" ? La réponse - très partielle sans doute - à cette question constituera notre conclusion.

La Dynamique des Systèmes Complexes s'adresse :

1 - Tout d'abord à ceux qui veulent mettre en pratique leur concepts "systémiques"

2 - A tous ceux qu'intéressent, qu'intriguent le changement, l'évolution, le mouvement.

3 - A ceux qui veulent analyser et comprendre le comportement dynamique de structures complexes, quelle que soit leur nature (on sait que cette démarche est depuis très longtemps employée, sous d'autres noms, par les scientifiques, les ingénieurs, pour analyser, simuler, améliorer le fonctionnement de systèmes physiques et technologiques : physique nucléaire, aéronautique, construction de centrales, d'usines, de plates-formes pétrolières, etc.. C'est avant tout son extension aux systèmes dits "flous" qui nous intéresse.).

4 - A ceux qui désirent mettre en évidence les facteurs structurels d'évolution d'un système, au delà d'explications purement conjoncturelles des phénomènes.

5 - A ceux qui sont conscients que les évolutions possibles de structures bouclées complexes sont très difficiles à prévoir, à analyser de manière intuitive. Des techniques existent, qui permettent une analyse rationnelle des comportements, qui parfois même rendent possibles la mise au point de modifications structurelles destinées à améliorer ces comportements.

6 - A ceux, enfin, qui ont à cœur de développer leur compréhension des phénomènes par une analyse quantitative des forces et des dynamiques correspondantes. Ceux-là iront jusqu'au bout de leur démarche, et feront l'effort nécessaire à la modélisation et à la simulation des systèmes qu'ils étudient.

7 - Et naturellement, à ceux qui, voulant faire de la prospective intelligente et ne se contentant pas d'extrapoler les tendances actuelles, veulent profiter d'une démarche et d'outils nouveaux pour analyser toutes les situations, toutes les évolutions possibles, mêmes les plus improbables, les moins crédibles a priori, celles que l'on n'ose pas imaginer.

A condition de ne pas perdre "le point de vue de Sirius", de ne pas accepter non plus un rôle souvent néfaste et toujours dangereux de Pythie des temps modernes, l'utilisateur de la Dynamique des Systèmes Complexes peut être assuré d'avoir effectivement à sa disposition à la fois une démarche systémique et un outil opérationnel.

## BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- (1) THOM, R (1972) Stabilité Structurale et Morphogénèse, Benjamin, New York
- (2) GLEICK, J (1987), Chaos : Making a New Science, Viking Penguin, New York
- (3) NICOLIS, G. and PRIGOGINE, I. (1977), Self-Organization in Nonequilibrium Systems, Wiley Interscience, New York, London
- (4) SCHIEVE, W. and ALLEN, P. (1982), Self-Organization and Dissipative Structures, University of Texas Press, Austin
- (5) MANDELBROT, B. B. (1977) Fractals, Freeman
- (6) MANDELBROT, B. B. (1982) The Fractal Geometry of Nature, Freeman
- (7) *System Dynamics Review*, Vol 4, No. 1-2, System Dynamics Society, 1988
- (8) SAEED, K. et BACH N.L. (1990), "Is Deterministic Chaos only a Property of Models", Proceeding of the 1990 International System Dynamics Conference, Chesnut Hill, Massachusetts, pp.972 - 982.
- (9) SAEED, K. (1992), "Chaos out of Stiff Models", Proceeding of the 1992 International System Dynamics Conference, Utrecht, pp.629 -638.
- (10) FABER, J. (1992), "Chaos in the Social Sciences", International System Dynamics Conference, Utrecht.
- (11) HAXHOLDT Ch et al., "Mode-locking and entrainment of endogenous economic cycles"*System Dynamics Review*, Vol 11, No 3, Fall 1995, Wiley
- (12) FORRESTER, J.W. (1961), Industrial Dynamics, MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- (13) FORRESTER, J.W. (196 ), Principle of Systems, MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- (14) ARACIL, J (1984), Introduction à la Dynamique des Systèmes, Presses Universitaire de Lyon.
- (15) BRAUNSCHWEIG, B.L (1985), La Simulation Sur Micro-Ordinateur : Les Modèles de Dynamique des Systèmes, Eyrolles.
- (16) WOLSTENHOLME, E.F. (1990), System Enquiry A System Dynamics Approach, John Wiley & Sons.
- (17) RICHARDSON, G.P. (1991), Feedback thought in Social Science and System Theory, University of Pennsylvania Press.
- (18) KARSKY, M. (1991), "La Dynamique des Systèmes en France", *Revue Internationale de Systémique*, Vol. 5, No. 2, Dunod, pp; 143 - 155.
- (19) KARSKY, M (1991), "What is to be done", *Revue Internationale de Systémique*, Vol. 5, No. 2, Dunod, pp; 109 - 117
- (20) SENGE, P (1990), The Fifth Discipline, Double Day Currency
- (21) PETERSON, D. and EBERLEIN, R. (1994), Reality Check : a bridge between systems thinking and system dynamics, *System Dynamics Review*, Vol 10 N° 2&3, Wiley & Sons
- (22) KARSKY, M., DORE, J-Ch, GUENEAU, P, (1992), "De la Possibilité d'Apparition de Catastrophes Différées", *ECODECISION*, N° 6, Septembre 1992, Montréal
- (23) ARACIL J.
- (24) BRAUNSCHWEIG, B. (1991), "TOPSI : A Tool to Help Project Management", ICEC Proceeding , 1991.
- (25) DRONNE, Y et KARSKY, M; (1978), "Le Complexe Mondial Soja-Maïs face aux Proteines Nouvelles", INRA-SNEA
- (26) KARSKY, M. (1981), "The Development an use of System Dynamics within an Industrial context", System Dynamics Research Conference, Boston-Massachusetts.
- (26) KARSKY, M, (1984), "Le Marché Mondial du Pétrole brut. Que se serait-il passé si...?" Colloque AEA Saragosse
- (27) DONNADIEU, G. et KARSKY, M (1990), "The Dynamics of Behavior and Motivation", Proceedings of the 1990 International System Dynamics Conference, Chesnut Hill, Massachusetts, pp. 319 - 332
- (28) MARPETNEWS : Le Marché Mondial du Pétrole N° 01.92, janvier 1992

Dernière Parution

DONNADIEU G., KARSKY M., (2002) « LA SYSTEMIQUE : penser et agir dans la complexité », Editions Liaisons.