



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **AG1565 V1**

Date de publication :
10 juillet 2004

Dynamique des systèmes complexes - Concepts et méthodologie

Cet article est issu de : **Archives**

par **Michel KARSKY**

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **15/01/2024**
Pour le compte : **7200031101 - universite de clermont auvergne // 195.221.123.15**

© Techniques de l'Ingénieur | Tous droits réservés

Dynamique des systèmes complexes

Concepts et méthodologie

par Michel KARSKY

Ingénieur ESE, Master of Science, Fellow CAES-MIT
Ancien directeur de la société KBS (Knowledge Based Simulation)

1. Principaux concepts.....	AG 1 565 - 3
1.1 Définitions et domaines d'application	— 3
1.2 Les différentes boucles	— 3
1.3 Du concept de boucle aux fondements de la dynamique des systèmes complexes.....	— 5
1.4 Retards et délais	— 5
1.5 Non-linéarités.....	— 6
1.6 Évolution structurelle	— 6
1.7 Synthèse.....	— 7
2. Processus et étapes de la modélisation dynamique.....	— 8
2.1 Analyse causale.....	— 8
2.2 Modélisation	— 9
2.3 Formalisation et quantification.....	— 10
2.4 Simulation. Calibrage et validation.....	— 11
3. Conclusion	— 12
Pour en savoir plus.....	Doc. AG 1 565

Confronté à un système complexe (nous appellerons ainsi toute structure, par exemple une entreprise comportant un grand nombre d'éléments interconnectés entre eux par des relations de causalité), l'être humain semble avoir du mal à analyser, à comprendre, encore moins à prédire son comportement dans le temps. Cette difficulté d'appréhension est essentiellement due à la présence de **boucles de rétroaction** au sein de presque tout système de ce type.

Que quelques-unes de ces boucles — ces cercles « vicieux » ou « vertueux », ces structures homéostatiques, régulatrices, 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. 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 [5] à transposer cette science au domaine des sciences humaines (au sens le plus général du terme, celui qui attire de plus en plus les jeunes ingénieurs : management, économie, structures psychologiques et sociales, urbanisme et même politique). Cette démarche, analysant d'un point de vue à la fois systémique et cybernétique le comportement de structures diverses dans de très nombreux domaines des sciences humaines, a connu un développement certain depuis

quelques années et a donné naissance à une démarche spécifique, voire même à une école de pensée que son créateur — Jay Forrester — et les auteurs les plus connus ont appelé « **dynamique des systèmes**. »

Les travaux correspondants, développés maintenant dans le monde entier, concernent tous les domaines pour lesquels le temps est une variable essentielle. Citons, entre autres, les domaines suivants en insistant sur ceux qui intéressent plus particulièrement les ingénieurs :

- stratégie d'entreprise et politique nationale et internationale [23] ;
- finance, gestion de production, marketing, management ;
- environnement, écologie, problèmes urbains, transports ;
- relations humaines (psychosociologie) [22] ; biologie, médecine [24].

À qui s'adresse cette démarche, que nous appelons aussi « **systémique de l'ingénieur** » ?

Répondre à cette question revient d'ailleurs en grande partie à introduire les principes de la dynamique des systèmes.

Cette démarche s'adresse :

- Tout d'abord aux personnes qui travaillent dans les très nombreux domaines où le temps est une variable essentielle, et qui rejettent, en la considérant comme dangereuse, l'attitude « y'a qu'a ».
- À toutes celles qu'intéresse le changement, qu'intrigue l'évolution des structures et des événements environnants, qui désirent comprendre le pourquoi et le comment de certaines évolutions.
- 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).
- Aux personnes qui désirent mettre en évidence les facteurs structurels agissants d'un système, au-delà d'explications purement conjoncturelles des phénomènes.
- À 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'a l'être humain à en prévoir et en analyser de manière intuitive le comportement dynamique.
- À quiconque est prêt à aller jusqu'au bout de la démarche, à savoir : formalisation, quantification et simulation des systèmes étudiés.
- À celles et à ceux, enfin, qui voulant faire de la prospective intelligente et ne se contentant pas d'extrapoler les tendances en cours, 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.

Ainsi, les pages qui suivent sont destinées :

- à présenter les concepts de base de la dynamique des systèmes complexes ;
- à donner une méthodologie de base permettant d'appliquer la démarche. Ceci est accompagné d'un exemple traité tout au long du déroulement de cette démarche.

1. Principaux concepts

1.1 Définitions et domaines d'application

Nota : 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 qui se limite à la description du mouvement, le concept de dynamique implique l'analyse des facteurs qui créent le changement, ou qui 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 socioculturelles 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 (que l'on peut représenter 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 (figure 1).

Exemple : 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, et 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, l'analyse de son comportement est d'autant plus aisée que les relations causales incluses dans la boucle sont linéaires. Quelques ouvrages récents [13] [14] donnent de nombreux exemples de comportement de telles boucles de rétroaction dans les domaines économiques et sociaux.

1.2 Les différentes boucles

■ Boucles stabilisatrices

Une boucle **régulatrice, stabilisatrice**, s'opposant au changement, 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 parle de **relation négative** lorsqu'une variation (accroissement ou baisse) de la variable cause crée 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, est schématisé sur la figure 2.

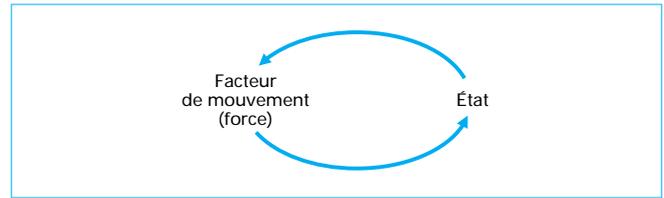


Figure 1 – Boucle état-force

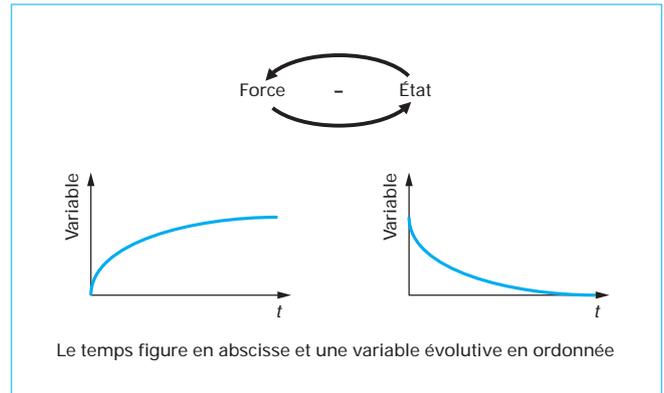


Figure 2 – Boucle stabilisatrice ou négative

Nous verrons plus loin que la plupart des boucles homéostatiques – stabilisatrices – se comportent en réalité 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).

Quelques **exemples** de boucles régulatrices :

- **Boucle « stock-production »** (figure 3a) : 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).
- **Boucle « prix-consommation »** (figure 3b) : 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 la 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.
- **Boucle « prix-production »** (figure 3c) : 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.

■ 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 !) (figure 4).

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 crée un effet dans le même sens) ou un nombre pair de relations négatives.

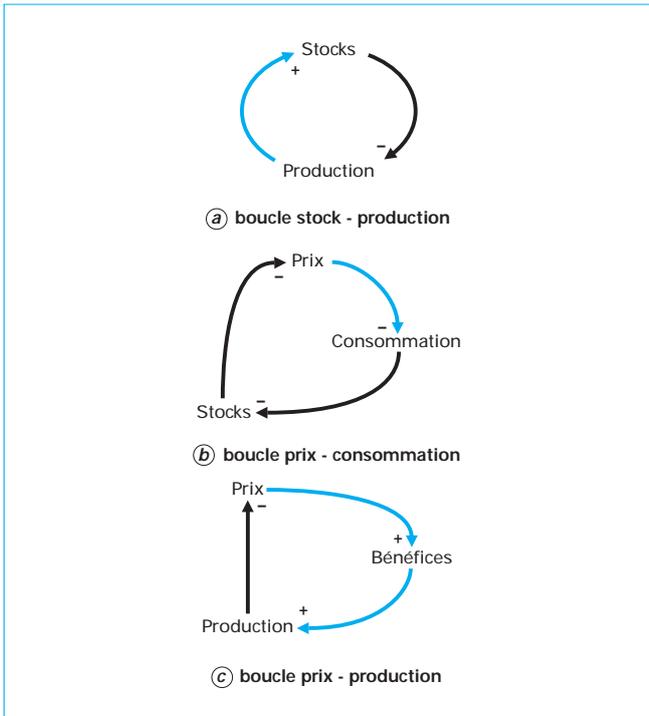


Figure 3 – Exemples de boucles régulatrices

Une relation positive se définit de la façon suivante :



si X croît alors Y croît, si X décroît, alors Y décroît.

Exemple : la figure 5 présente 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.

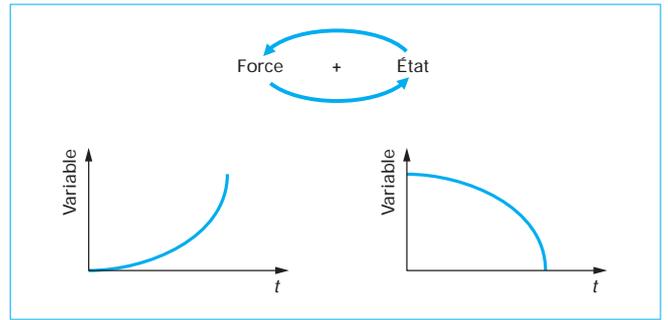


Figure 4 – Boucle explosive ou positive

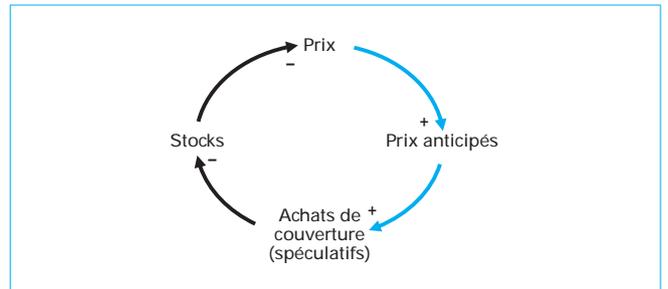


Figure 5 – Exemple de boucle explosive : boucle achats spéculatifs

■ Interaction entre boucles

L'interconnexion de deux boucles, dont les comportements individuels possibles sont limités aux quatre courbes décrites précédemment (figures 2 et 4), peut donner lieu, si certaines relations entre les variables comportent des retards (délais), aux comportements types montrés sur la figure 6.

Et nous verrons bientôt combien le problème peut se compliquer si ces boucles de rétroaction comportent des éléments non linéaires. Car le comportement temporel d'une structure comportant plusieurs boucles interconnectées ne peut se déduire aisément de l'analyse du comportement individuel de chaque boucle ; et que dire alors d'un système comportant 50 ou 100 boucles de rétroaction ?

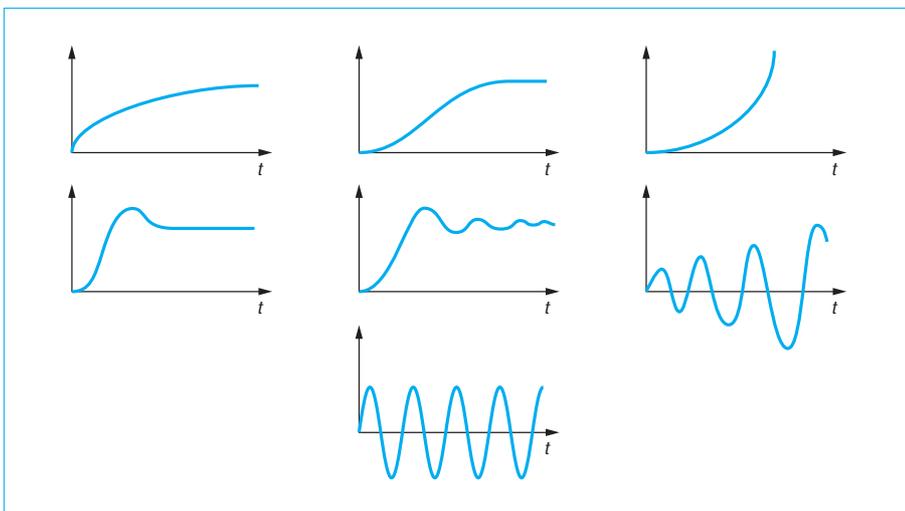


Figure 6 – Interaction entre boucles

1.3 Du concept de boucle aux fondements de la dynamique des systèmes complexes

C'est le moment de venir aux fondements de la dynamique des systèmes complexes. 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 : management et stratégie d'entreprise, économie, environnement, sociologie ; ou dans 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 pas toujours 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 ». À 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 (aide à la décision), 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 1950, qui a permis de comprendre les principes de comportement des systèmes bouclés. Il s'agit d'autre part 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 systèmes complexes.

On notera notre insistance à combiner le **concept de boucle**, un des concepts fondamentaux de la systémique, et les **outils pratiques de simulation**, combinaison de sciences et de technologies, démarche qui caractérise la dynamique des systèmes complexes, et qui associe sans cesse concepts qualitatifs et moyens pratiques de formalisation et de quantification, de façon à donner des outils pratiques de décision.

1.4 Retards et délais

En fait, les comportements décrits précédemment, 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 »** (figure 3a) : 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 »** (figure 3b) : 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) (figure 7a).

- **Boucle « prix-production »** (figure 3c) : la remarque précédente 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 (figure 7b).

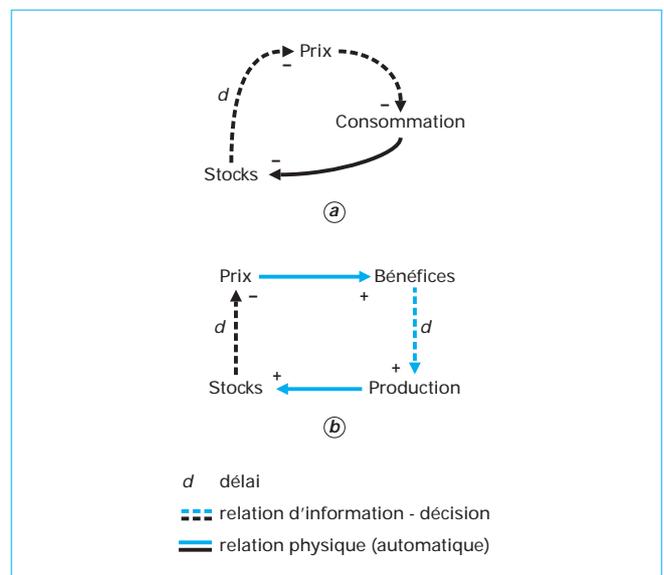


Figure 7 - Exemples de boucles avec délai

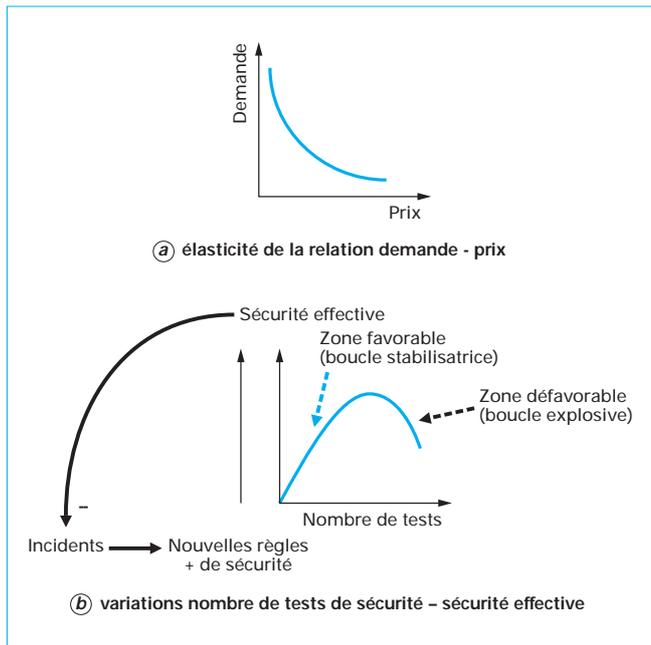


Figure 8 - Exemples de relations non linéaires entre variables

1.5 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 deux **exemples** simples de relations non linéaires entre variables :

- Le premier exemple (figure 8a) montre la **relation entre prix et demande** : l'augmentation des prix entraîne la diminution de la demande, et réciproquement, mais cette variation est non linéaire (courbe).
- La deuxième exemple (figure 8b) concerne les **tests de sécurité** : au début, tout nouveau test de sécurité tend à accroître la sécurité effective. Mais si ces tests de sécurité deviennent trop nombreux, toute adjonction d'un test nouveau finit par produire, suite aux nombreuses corrections effectuées, un effet inverse à celui désiré, c'est-à-dire tend à faire retomber la sécurité effective.

La présence de relations exprimées par des courbes comme celle de la figure 8b, explique en partie la complexité des systèmes contenant de telles relations. La courbe de la figure 8a, 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).

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 figure 6 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 possible du système correspondant.

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.

1.6 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 fabriqua 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 ne peut donc être incorporée *a 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 générera 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 accéléreront encore la hausse des prix : cercle vicieux, boucle accélératrice) et une hausse des investissements pour satisfaire la demande dans un domaine qui paraît rentable (voir courbes figure 9).

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.

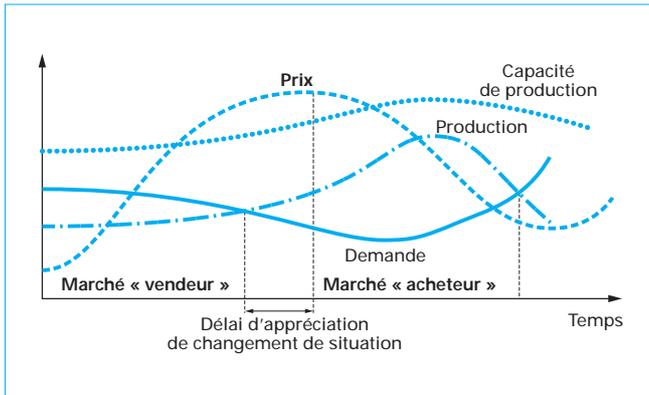


Figure 9 – Changement d'état d'un marché passant de « vendeur » à « acheteur »

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.**

1.7 Synthèse

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

- 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.

- La priorité est donnée à l'**analyse des facteurs** (« forces ») qui causent ou au contraire 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. Cela 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 cela 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).

- La complexité de comportement d'un système (entendons par là : imprévisibilité apparente, comportement spectral compliqué, dynamiques multiples) est due essentiellement à la présence de **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 compliquent bien les choses.

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.

C'est donc l'ensemble de ces « données » quantifiées, écrites et orales que nous essayerons de prendre en compte pour analyser, modéliser et simuler un système. Ceci nous amène à faire **deux remarques** qui nous paraissent importantes et très souvent ignorées :

- **Recherche de données** : 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'influence** 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 de nature souvent exclusivement qualitative.

- **Réalités possibles et unicité historique** : il est normal que tout résultat de simulation soit confronté à la réalité. Mais alors se pose la question : quelle réalité ? La réponse dépend à la fois du sujet traité, et de l'attitude face à ce sujet.

Lorsqu'il s'agit d'analyser des domaines où des experts ont accumulé une grande expérience, diversifiée au possible, tenant compte de situations et de comportements extrêmes, expérience qui s'exprime par des données, des écrits descriptifs et surtout une connaissance orale du sujet, cette expertise accumulée constitue une référence à laquelle on est en droit de confronter avec confiance les résultats de simulation.

Mais dans certains domaines, en particulier les études économiques, la « réalité » est celle de l'historique passé, et c'est à cet historique que l'on compare forcément les simulations et que l'on exige que se conforme le modèle. Or c'est là un historique **unique** qui constitue une référence, obligatoire certes mais plutôt appauvrissante car empêchant une analyse de diversités de comportements. Dans une certaine mesure, on peut dire que la comparaison avec un passé historique empêche ou pour le moins limite les possibilités d'analyse de sensibilité des modèles, donc des réalités à venir possibles.

Pour donner un **exemple**, supposons un comportement de type oscillatoire, de période stable mais dont l'amplitude peut aller du simple au double en fonction de certains paramètres. En sociologie, éventuellement en stratégie d'entreprise ou en management, un tel comportement a une même signification quelle que soit l'amplitude des oscillations. Par contre en modélisation économique, un écart de plus de 10 à 15 % par rapport à l'historique connu est considéré comme inadmissible et rend le modèle peu crédible. Pourtant il s'agit là du même modèle qui aurait pu représenter un comportement à peine différent, aussi probable **a priori** que le comportement réel mais dont la probabilité **a posteriori** est devenue nulle, puisque cette occurrence n'a pas eu lieu.

2. Processus et étapes de la modélisation dynamique

Les paragraphes qui vont suivre sont destinés à aider les personnes intéressées à démarrer un processus de modélisation, à éviter le blocage que l'on constate souvent lors de l'analyse d'un nouveau problème ou lors de la modélisation d'un nouveau système.

Nous suggérons de décomposer le processus de modélisation dynamique en quatre étapes :

- l'**analyse causale** qui permet d'obtenir un modèle qualitatif simple (§ 2.1) ;
- la **modélisation** (étape de formalisation dynamique et de quantification) (§ 2.2 et 2.3) ;
- la **simulation** qui doit permettre d'obtenir un modèle aussi représentatif et fiable que possible (§ 2.4) ;

– la **transmission de la connaissance et de la compréhension du modèle** (§ 2.4).

Nous illustrerons progressivement la démarche à l'aide d'un **exemple** simple portant sur une **entreprise de distribution d'un produit** (voitures, pièces détachées, etc.).

Le problème posé par le responsable de l'entreprise est d'avoir un outil qui permette :

- une analyse prospective du fonctionnement technico-économique de son entreprise ou d'un secteur de cette entreprise ;
- une compréhension améliorée des divers facteurs intervenant au cours du temps, et de leurs influences réciproques ;
- une aide à la décision en tenant compte, en particulier, d'effets possibles long terme.

2.1 Analyse causale

■ La dynamique des systèmes est utilisée lorsque l'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.

■ Quelles variables prendre en considération ? À 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 pas plus de 15 à 20 variables, en insistant sur le fait que ces diagrammes sont interconnectés entre eux.

Prenons notre **exemple** : nous conseillons de ne pas trop dépasser, en complexité sur une seule page, un diagramme comme celui de la figure 10, décrivant les principales variables qui intéressent les responsables de la production, de la distribution et de la **gestion d'un produit**. Naturellement, d'autres diagrammes détailleront le fonctionnement des variables de ce diagramme de principe ou mettront en évidence, par exemple, les notions de concurrence.

Le diagramme ci-dessus peut paraître assez simple, pourtant il contient déjà un nombre non négligeable de boucles de rétroaction. Ainsi, on constate que la variable « carnet de commande » intervient dans 8 boucles (de longueurs diverses), que la variable « stock » intervient 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 variable « 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). Si l'on essaye de représenter ce même processus de distribution d'un produit et de gestion de son stock en ajoutant la notion de concurrence entre deux produits ou entre deux vendeurs, on obtient un diagramme rebutant, difficilement exploitable (sauf par l'ordinateur) et comportant quelques 300 boucles de rétroaction.

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).

Dans notre **exemple de gestion de stock**, les premières simulations montrent un risque de variations récurrentes qui peuvent être gênantes et mal perçues par les responsables du système correspondant. Le modèle sera alors bien utile pour aider à trouver la ou les modifications de paramètre ou de structure qui permettront d'éviter ou d'atténuer les oscillations (figure 15).

■ Calibrage et validation

En même temps que les premières simulations, viennent les phases de calibrage et de validation du modèle.

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.

Les phases de calibrage et validation, dont nous avons dit combien elles étaient parfois difficilement différenciables, peuvent se faire de plusieurs façons.

● **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.

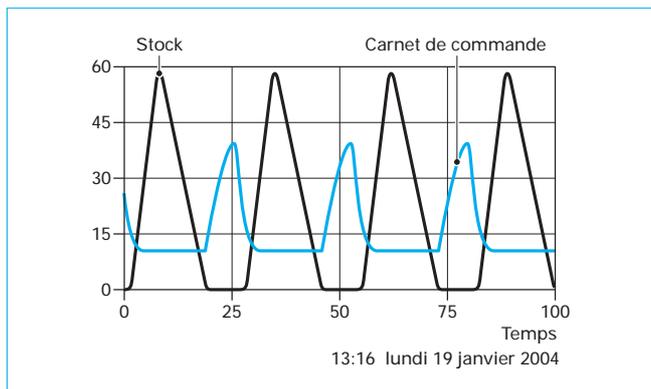


Figure 15 – Gestion de stock. Premières simulations

● **Confrontation avec les statistiques existantes** et réglage du modèle pour tenter de minimiser les différences entre résultats de simulation et séries historiques. Certains logiciels 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.).

● **Avis d'expert** : l'absence de statistiques ne signifie pas l'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, rappelons-le, 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. Cette expertise permet 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.

3. 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.

Si l'on se lance alors dans cette démarche, et à condition de ne pas perdre « le point de vue de Sirius », c'est-à-dire une vision globale des choses, vision globale qui constitue un des principes de toute approche systémique, à condition 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.

Pour finir, 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. Et même s'agissant de domaines qui peuvent paraître plus figés, comme la médecine, la biologie, la psychosociologie, il faudra constamment prendre en compte l'évolution des connaissances, et introduire les changements correspondants dans la structure des modèles correspondants.

Dynamique des systèmes complexes

Concepts et méthodologie

par Michel KARSKY

*Ingénieur ESE, Master of Science, Fellow CAES-MIT
Ancien directeur de la société KBS (Knowledge Based Simulation)*

Références bibliographiques

- [1] ARACIL (J.). – *Introduction à la Dynamique des Systèmes*. Presses Universitaire de Lyon (1984).
- [2] BRAUNSCHWEIG (B.L.). – *La simulation sur micro-ordinateur : Les Modèles de Dynamique des Systèmes*, Eyrolles (1985).
- [3] CORDONNIER (J.-L.). – *Modéliser en sciences de la vie et de la terre*. Centre National de Documentation Pédagogique (2002).
- [4] DONNADIEU (G.) et KARSKY (M.). – *The dynamics of behavior and motivation*. Proceedings of the 1990 International System Dynamics Conference, Boston (1990).
- [5] DONNADIEU (G.) et KARSKY (M.). – *Les dynamiques de la motivation*. Revue Internationale de Systémique, Vol. 7, n° 1 (1993).
- [6] DONNADIEU (G.) et KARSKY (M.). – *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Éditions Liaisons (2002).
- [7] FORRESTER (J.W.). – *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1961).
- [8] FORRESTER (J.W.). – *Principle of Systems*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1961).
- [9] KARSKY (M.). – *La dynamique des systèmes en France*, *Revue Internationale de Systémique*. Vol. 5, n° 2, Dunod, p. 143-155 (1991).
- [10] KARSKY (M.). – *What is to be done*, *Revue Internationale de Systémique*. Vol. 5, n° 2, Dunod, p. 109-117 (1991).
- [11] 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).
- [12] PAULRE (B.). – *La causalité en économie*. Presses Universitaires de Lyon (1985).
- [13] PETERSON (D.) et EBERLEIN (R.). – *Reality check : a bridge between systems thinking and system dynamics*, *System Dynamics Review*. Vol. 10 n° 2&3, Wiley & Sons (1994).
- [14] RICHARDSON (G.P.). – *Feedback thought in social science and system theory*. University of Pennsylvania Press (1991).
- [15] RICHARDSON (G.P.). – *Modelling for management*. The International Library of Management, Dartmouth (1996).
- [16] DE ROSNAY (J.). – *Le Macroscopie*. Le Seuil (1975).
- [17] SAEED (K.) et BACH (N.L.). – *Is deterministic chaos only a property of models*. Proceeding of the 1990 International System Dynamics Conference, Chesnut Hill, Massachusetts, p. 972-982 (1990).
- [18] SAEED (K.). – *Chaos out of Stiff Models*. Proceeding of the 1992 International System Dynamics Conference, Utrecht, p. 629-638 (1992).
- [19] SENGE (P.). – *The fifth discipline*. Double Day Currency (1990).
- [20] STERMAN (J.D.). – *Business dynamics*. McGraw-Hill (2000).
- [21] WOLSTENHOLME (E.F.). – *System enquiry a system dynamics approach*. John Wiley & Sons (1990).

Dans les Techniques de l'Ingénieur, traité L'entreprise industrielle

- [22] DONNADIEU (G.). – *Approche systémique des facteurs humains dans l'entreprise*. AG 1 520 (2002).
- [23] DONNADIEU (G.). – *Motiver les hommes dans les entreprises : approche systémique*. AG 1 525 (2004).
- [24] BERNARD-WEIL (E.). – *Approche des systèmes ago-antagonistes*. AG 1 575 (2002) – ainsi que tous les articles de la rubrique « Systèmes complexes ».

Sites Web et logiciels

D'un point de vue pratique, pour faciliter la réalisation des modèles et des simulateurs correspondants, trois ou quatre principaux logiciels sont disponibles sur le marché (sans compter bien d'autres logiciels quelque peu spécialisés en fonction des applications envisagées : environnement, gestion de production, management, etc.). Ces logiciels sont, par ordre d'apparition sur le marché :

Ithink® et STELLA® (deux logiciels jumeaux entièrement interchangeables), VENSIM® et POWERSIM®

Pour tous renseignements concernant ces logiciels, et plus généralement les concepts développés dans cet article, voir le site Web ci-dessous :

<http://www.kbs-simulation.com>

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques