

Les modèles de dynamique des systèmes : des outils pédagogiques pour une aide à la *gouvernance* des systèmes ?

Valérie GACOGNE
COMPLEXIO
10 bis Avenue des Gobelins, 75005 Paris
valerie.gacogne@complexio.info

Résumé

La dynamique des systèmes peut être définie comme une *méthode d'aide à l'intelligence des systèmes complexes* (Karsky et Paulré, 1998). Initiée à la fin des années 50 par Jay W. Forrester au MIT, elle fêtera ses 50 ans en 2007. Utilisée initialement dans le domaine de l'industrie, puis des sciences sociales, ses champs d'application sont devenus extrêmement nombreux et variés. Alors qu'elle s'est largement développée dans la plupart des régions du monde : Amérique du nord et latine, Europe de l'ouest et de l'est, Asie ; elle est restée à l'état de balbutiements en France. Pourtant, parmi d'autres techniques de modélisation des systèmes complexes, elle permet de créer des modèles de simulation conçus comme de véritables outils pédagogiques.

Ces outils peuvent aider à comprendre les mécanismes sous-jacents à des comportements ou évolutions qui apparaissent parfois comme complexes et/ou contre-intuitifs, et permettent de tester de multiples hypothèses et scénarios du type *Que se passerait-il si ... ?*.

Ces modèles de simulation permettent ainsi de créer des outils d'aide à la décision et plus largement de véritables outils pédagogiques d'aide à la gouvernance des systèmes.

Mots-clés : dynamique des systèmes, simulation, outil d'aide à la décision, outil pédagogique, gouvernance.

System Dynamics Modelling : True Pedagogical Tools for System Governance ?

Abstract

System Dynamics can be defined as a method that helps understand complex systems (Karsky and Paulré, 1998). Jay W. Forrester invented System Dynamics in the late 50's; the year 2007 will mark the 50th anniversary of the founding of the field. First used in the industrial field, then applied to social sciences, the scope has been widely enlarged. It has been developed in many regions of the world: North and Latin America, Western and Eastern Europe, Asia; however it still seems to be at its beginnings in France. And yet this method enables to create simulation models that are true pedagogical tools.

It can help understand underlying mechanisms at the origin of complex behaviours and changes that are sometimes counter-intuitive. It allows the testing of many different hypotheses and scenarios such as *What if...?*.

This type of simulation models enables to build decision support tools and more widely true pedagogical tools for system governance.

Keywords : System Dynamics, Simulation, Decision Support Tool, Pedagogical Tool, Governance.

Introduction

Les modèles de dynamique des systèmes sont des modèles de simulation informatiques basés sur une représentation systémique et dynamique de la réalité. Nous considérons qu'ils doivent être présentés avant tout comme des outils, des instruments développés à l'usage de toute discipline, quelle qu'elle soit, dans la mesure où ils sont à même de répondre à des problématiques en lien avec les systèmes complexes. Le plus souvent ils sont développés comme des outils d'aide à la décision, permettant de tester des hypothèses du type *Que se passerait-il si ... ?*. Comme l'indique la formulation même de la question, l'objectif premier n'est pas de déterminer une situation optimale, elle soulignerait plutôt l'importance donnée à la compréhension des phénomènes observés. La dynamique des systèmes peut être ainsi définie comme une *méthode d'aide à l'intelligence des systèmes complexes*, comme l'indiquent M.Karsky et B.Paulré (*in* Paulré, 1998, p.16). La vocation explicative et pédagogique de ces modèles de simulation est donc forte. Ils peuvent être considérés comme des outils d'aide à la décision, mais plus largement comme des outils pédagogiques d'aide à la gouvernance des systèmes.

Cette communication propose d'exposer succinctement les principes de la modélisation en dynamique des systèmes, et l'importance accordée à la simulation du modèle en présentant quelques exemples. Elle se veut une introduction modeste à cette méthode, et pour en illustrer son rôle explicatif et pédagogique, la structure d'un archétype classique en dynamique des systèmes *Shifting the burden to the intervenor* y est présentée. L'objectif est, qu'au travers de la compréhension de la structure de cet archétype, et des comportements possibles qui peuvent en résulter, chacun puisse se l'approprier et en imaginer des applications possibles dans sa propre discipline. Cet archétype de la dynamique des systèmes présente en effet un caractère assez général.

I. Quelques éléments sur la *dynamique des systèmes*

1. L'origine de la dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes trouve son origine dans la théorie du contrôle (ou de la commande) et de la communication, domaine qui a été appelé *cybernétique* en 1948 par son fondateur Robert Wiener. Rappelons que le terme de cybernétique a été formé à partir du mot grec *kubernêsis* signifiant littéralement *action de manœuvrer un bateau*, et au sens figuré *action de diriger, de gouverner*. Sans développer la cybernétique qui a donné de nombreuses applications dans des disciplines aussi variées que la biologie ou l'intelligence artificielle, nous en retiendrons le principe essentiel de la rétroaction, qui d'après Wiener, a été explicité pour la première fois par Maxwell dans un article datant de 1868 (*in* Clergue, 1997, p.34-35). Les phénomènes de rétroaction jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de contrôle avec l'information, ils font aussi partie des principes de base de la dynamique des systèmes.

Durant la seconde guerre mondiale, J.W. Forrester travaillait au MIT sur les servomécanismes puis se consacra aux systèmes asservis (*feedback control system*). Il se tourna également un peu plus tard vers des questions de management avec l'ouverture au MIT de la Sloan School of Management. C'est sur ces bases qu'il créa le premier modèle de dynamique des systèmes en cherchant à résoudre un problème posé par un employé de General Electric (GE). La représentation, puis la simulation réalisée sur papier, selon les principes qui ont conduit à la dynamique des systèmes, lui permirent de comprendre en effet pourquoi certaines usines de GE étaient soumises à des phénomènes cycliques. Il aboutit par ce moyen à la conclusion que le management qui visait à éviter ces phénomènes en était aussi à l'origine, car il créait un système instable et potentiellement oscillatoire.

La modélisation en dynamique des systèmes est donc née il y a pratiquement 50 ans sous l'impulsion de Jay W. Forrester, et bien qu'elle ait connu un succès certain suite aux travaux menés conjointement avec le Club de Rome (voir *World Dynamics*, 1971, puis *The Limits to Growth*, 1972¹), l'apparition au cours de ces dernières années d'ordinateurs personnels - plus puissants - a largement contribué à son utilisation actuelle. D'après Jay W. Forrester, les évolutions récentes de

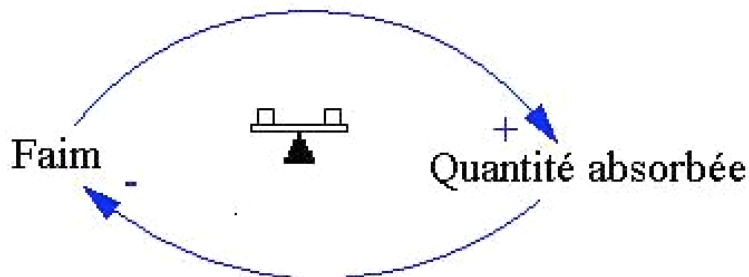
¹ On trouve aujourd'hui l'ouvrage *Beyond the Limits* édité en 1992, écrit par trois des mêmes auteurs (Meadows & al.).

la dynamique des systèmes pourraient ainsi aider à modifier nos modèles de représentation mentale du monde.

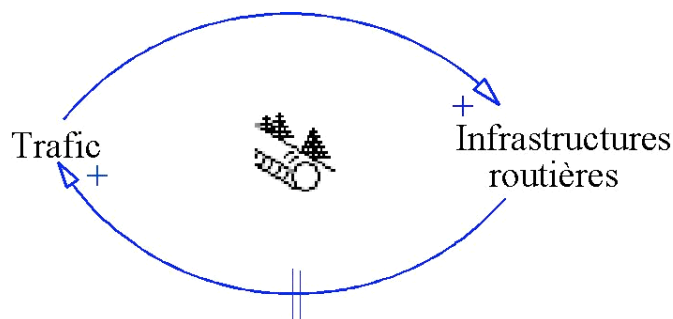
2. Quelques principes de dynamique des systèmes

Cette partie a pour objet d'introduire la modélisation en dynamique des systèmes, en mettant principalement en avant l'origine de cette démarche, à savoir une perception de la réalité sous une forme systémique mettant en œuvre des mécanismes de rétroaction. L'un des principes de base consiste en effet à rendre compte des boucles de rétroaction (appelées aussi *feedback*). Celles-ci sont de deux sortes : elles peuvent être soit négatives c'est-à-dire stabilisatrices (premier exemple ci-après), soit positives ou explosives, dans certains cas ces dernières seront qualifiées de cercles vertueux ou vicieux. Dans le premier exemple (premier schéma ci-dessous), le fait de manger permet de combler sa faim et cette action va conduire à faire disparaître, pour le moins temporairement, la cause qui se trouve à son origine.

Un exemple de boucle de rétroaction négative (ou stabilisatrice)²



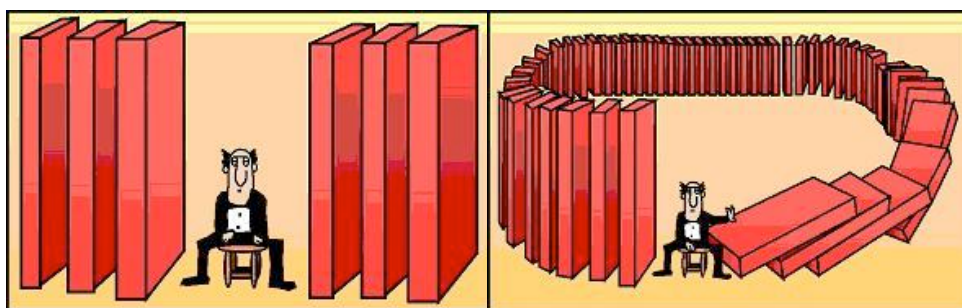
Dans le deuxième cas, il s'agit d'une illustration d'un phénomène bien connu en économie des transports : le trafic induit. De manière un peu simplifiée, si une route est congestionnée et qu'une voie supplémentaire est construite, dans un premier temps le trafic sera fluidifié. Mais à moyen terme cette infrastructure pourra revenir au même niveau de congestion car un nouveau trafic aura apparu, avec d'autres véhicules qui n'empruntaient pas auparavant cette infrastructure (ce trafic correspond à une augmentation de la mobilité des usagers). Il s'agit du trafic induit, c'est une conséquence de la création de nouvelles infrastructures routières, effet qui intervient avec retard. Dans le cas présent, le trafic conduit à construire plus d'infrastructures routières qui, à leur tour, génèrent du trafic, il s'agit donc d'une boucle explosive. Le délai est symbolisé sur le diagramme par deux petits traits sur la flèche, les retards dans les conséquences de certains événements constituent un autre élément essentiel de la dynamique des systèmes.



Un exemple de boucle de rétroaction positive (ou explosive)

² Le signe positif sur le diagramme indique que lorsque la variable « faim » croît, la quantité absorbée croît aussi. À l'inverse, le signe négatif indique bien que plus la quantité absorbée augmente, moins la sensation de faim se fait ressentir (en principe !). La multiplication des signes - et + conduit à -, il s'agit en effet d'une boucle négative. Dans le deuxième exemple, la multiplication des deux signes + donne +, il s'agit d'une boucle positive.

Ces phénomènes rétroactifs font intervenir des boucles multiples, négatives et positives, des relations non linéaires³, et le plus souvent des délais ou retards qui augmentent la complexité d'évolution du système. Cette complexité est souvent à l'origine d'une mauvaise perception intellectuelle des phénomènes et de leurs conséquences, ou plus exactement d'une perception partielle. Nous avons, en effet, souvent tendance à ne considérer que les conséquences immédiates des événements ; le dessin suivant en propose une illustration. Ce personnage va subir les mésaventures d'une perception réductrice et à court terme de son acte, il pousse le premier domino parce qu'il se sent gêné et enfermé par cet élément, mais celui-ci va provoquer une réaction en chaîne...



Perception immédiate d'un événement

**et retard dans ses effets
(in Gacogne, 2003)**

Dans la réalité, les conséquences des événements sont naturellement bien moins évidentes, et parfois contre intuitives en raison de la complexité des influences exercées par les différentes boucles de rétroaction. L'évolution d'un système est difficile à appréhender intellectuellement, et nécessite pour en comprendre le comportement de recourir à des modèles, dont les simulations sont l'occasion de tester maints scénarios. En outre, elle permet de représenter des processus de décision et des comportements, en tenant compte notamment de variables de nature qualitative et non pas seulement quantitative.

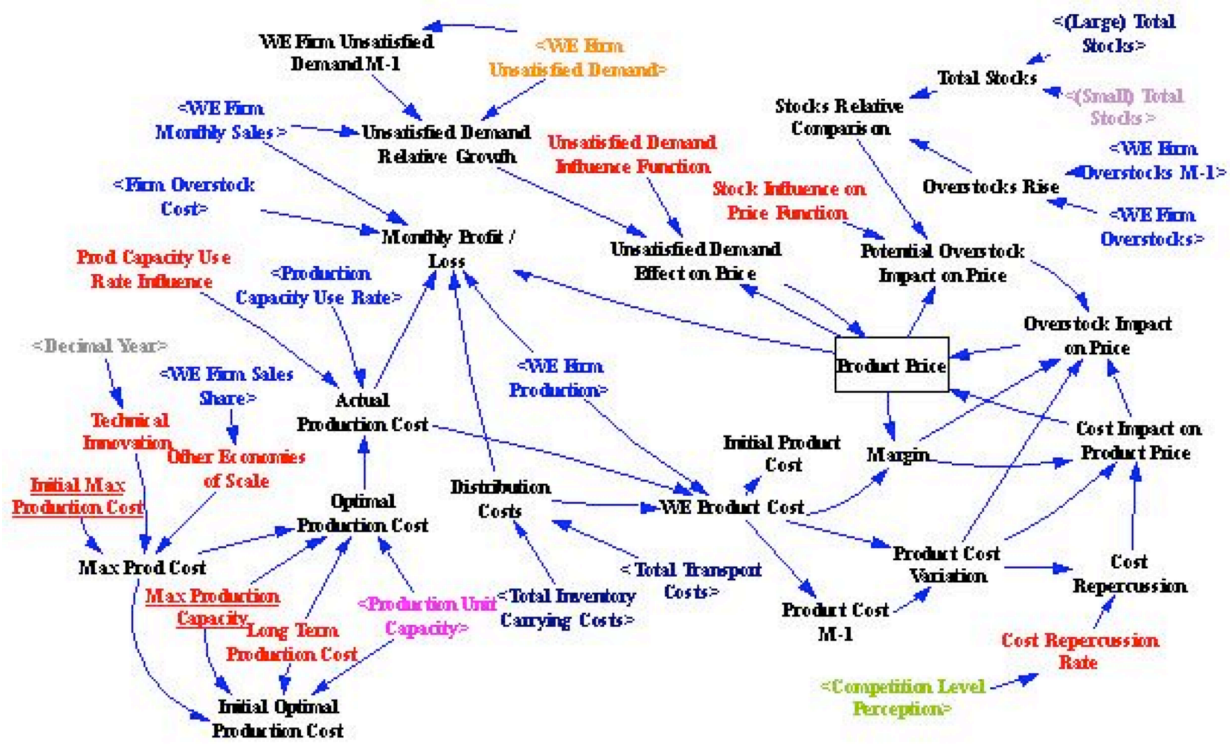
II. Du diagramme d'influence à la simulation informatique du modèle

L'étude des systèmes complexes nécessite, pour en appréhender le fonctionnement au cours du temps, modélisation et simulation. La modélisation en dynamique des systèmes distingue d'une part la structure du système, et d'autre part le comportement dynamique qui en résulte. La structure et les relations entre variables qui le composent sont représentées sous forme de diagrammes d'influence (voir l'exemple ci-dessous). La formalisation du modèle conduit ensuite à distinguer les variables selon trois sortes. Les variables de stock ou d'accumulation sont celles qui caractérisent l'état du système à chaque instant (calcul d'intégrales), ce sont aussi celles qui génèrent l'information sur laquelle décisions et actions sont basées (Sterman, 2000, p.192). Les variables de flux traduisent les effets des forces qui agissent sur l'état du système, enfin les variables auxiliaires peuvent être des constantes, des paramètres, comporter des relations logiques ou même des fonctions (permettant notamment d'introduire des relations non linéaires⁴). Les forces en présence modifient l'état du système qui, elles-mêmes, peuvent être modifiées par l'évolution de l'état du système.

En dynamique des systèmes, le paramètre essentiel reste le temps. Comment le système va-t-il évoluer au cours du temps ? La simulation informatique va permettre d'analyser l'évolution du système au cours du temps et d'aider à en comprendre le fonctionnement, chaque variable pourra être visualisée sous forme de graphique.

³ Autre élément important de la dynamique des systèmes mais que nous ne développerons pas ici.

⁴ Ce qui va correspondre formellement à représenter des systèmes d'équations différentielles non linéaires d'ordre n.

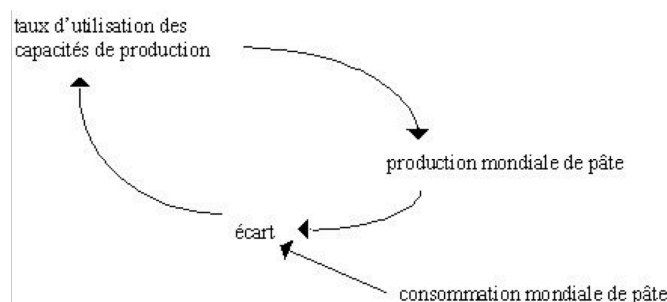
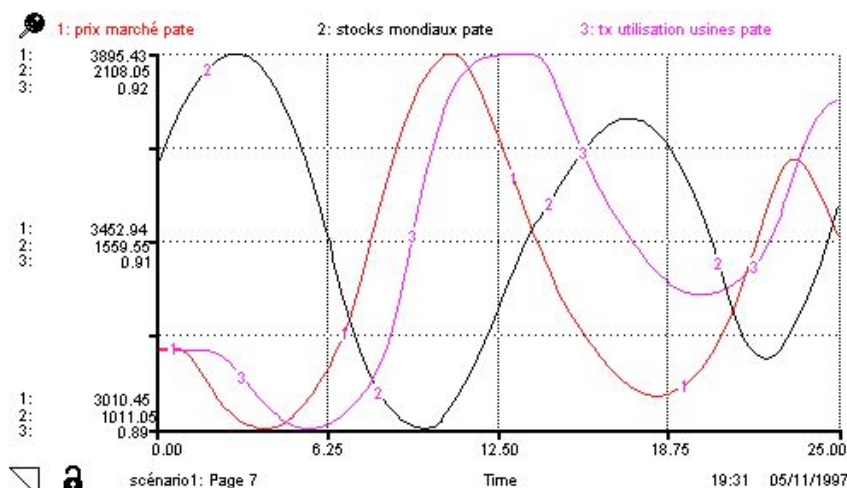


Exemple de diagramme d'influence

(extrait d'un modèle réalisé avec le logiciel Vensim, Gacogne 2006)

L'exemple suivant, qui fait référence au marché mondial de la pâte à papier, est une illustration de résultats graphiques obtenus à partir de la simulation d'un modèle de dynamique des systèmes sur la filière bois-papier-carton (le temps est en abscisse, ici les simulations se déroulent sur 25 ans).

Production et marché mondial de la pâte à papier (Calzada & Gacogne, 1997)



Ce graphique représente typiquement un marché à la fois mondial et cyclique. Lorsque les stocks mondiaux (représentés par les stocks Norscan: pâte nord-américaine et scandinave invendue) sont élevés, c'est-à-dire en pratique dès qu'ils dépassent 1,4 ou 1,5 millions de tonnes, les prix sont au plus bas entraînant alors une réduction du taux d'utilisation des capacités de production de pâte à papier. Cette décision de réduire la production, face à la forte baisse des prix, demande aux producteurs un temps d'adaptation, d'autant qu'il s'agit d'une décision qui entraîne de multiples conséquences dans une industrie extrêmement capitalistique. On observe ainsi sur les graphiques les décalages de temps qui existent d'une part entre les niveaux de stock et le prix de marché, et d'autre part entre ce même prix et le taux d'utilisation des capacités de production. Dans ce type de marché, il est clair que l'on se retrouve fréquemment confronté à des comportements spéculatifs qui font intervenir à la fois des feedbacks et des retards induits par les réactions des acteurs face aux événements. La dynamique des systèmes s'appliquera ainsi parfaitement à ces cas. Elle permet de modéliser des paramètres purement physiques (niveau de stocks, flux...) mais aussi de simuler des processus de décision et des comportements.

Les simulations peuvent aussi conduire à modifier, parfois radicalement, notre perception de la réalité (ou la représentation que nous nous faisons). Nous soulignerons aussi l'importance essentielle accordée à la démarche du point de vue du mode de raisonnement, qui oblige à réfléchir sur la structure sous-jacente du modèle à l'origine des comportements observés. La construction même du modèle et la réalisation de diagrammes d'influence conduisent souvent à découvrir, à identifier d'autres interrelations dans le système, et à comprendre ainsi certains comportements et les conséquences à plus long terme d'événements.

L'importance des effets intervenant à la fois sur le court et le long terme seront explicités avec la présentation de l'archétype *Shifting the Burden to the Intervenor*.

III. Les scénarios

Comme l'a souligné souvent son fondateur, Jay W. Forrester, les modèles de dynamique des systèmes n'ont pas pour objet de déterminer des situations optimales, mais de répondre à des questions du type *Que se passerait-il si ... ?*. Ce type de modèle doit ainsi permettre de tester des hypothèses auquel le système n'a jamais été soumis, c'est-à-dire de mettre en œuvre des scénarios qui n'auraient jamais été observés par le passé. La modélisation en dynamique des systèmes peut être ainsi utilisée comme une sorte de laboratoire permettant d'expérimenter des scénarios divers et éventuellement complexes, en agissant sur un certain nombre de variables et/ou paramètres. Le modèle de simulation devient en ce sens un outil pédagogique d'aide à la gouvernance des systèmes.

La dynamique des systèmes n'est naturellement pas la seule méthode permettant de modéliser et simuler des systèmes complexes, en particulier sociaux, et ne s'applique pas en toutes circonstances. Nous n'exposerons pas ici les différentes méthodes et approches existantes et en développement. Nous indiquerons seulement qu'elles peuvent rarement se substituer (bien que cette question soit très souvent discutée), le plus souvent l'une ou l'autre apparaît la plus appropriée compte tenu de la problématique, parfois elles peuvent être complémentaires⁵. A titre d'exemple, lorsque plusieurs niveaux d'abstraction sont à considérer dans un système, un modèle de dynamique des systèmes se situera à un niveau plutôt agrégé (ou macro). Si l'on s'intéressait au Tour de France, on pourrait chercher par exemple à modéliser et simuler le comportement d'un cycliste en particulier en tant que système, en tenant compte de toutes sortes de variables interagissant entre elles et avec son environnement, simulant son état physique, moral, ses réactions face à la course compte tenu de sa tactique, etc. On pourrait aussi simuler le comportement de l'ensemble du peloton comme un tout, comme si on l'observait d'un hélicoptère (on notera que la problématique posée ne serait bien sûr pas la même dans les deux cas de figures). En revanche si l'on voulait simuler simultanément le comportement de chacun des cyclistes (avec leurs spécificités) à

⁵ Cette notion de complémentarité, avec la perspective éventuellement de développer des modèles dits *hybrides*, fait l'objet de nombreuses recherches actuellement (voir à titre d'exemple un bref exposé de quelques travaux récents dans *Alternative Methodologies and Techniques*, Gacogne, 2005)

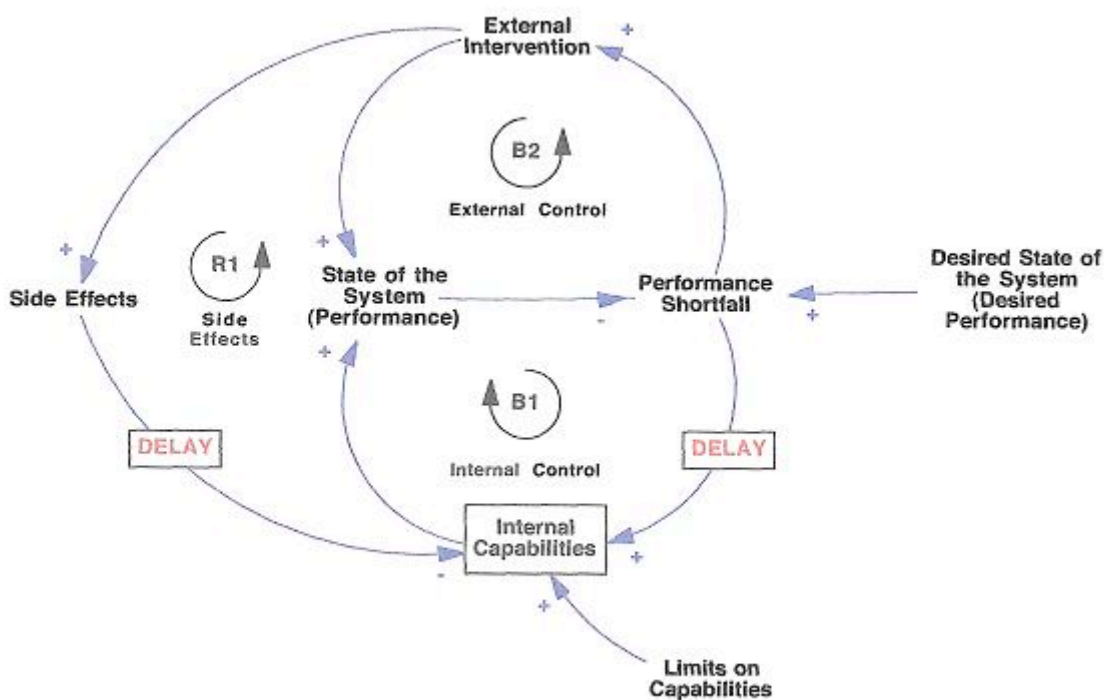
l'intérieur du peloton en interaction avec le *systeme peloton* qu'ils constituent, une autre approche de type *multi-agents* (désagrégée) serait alors plus appropriée⁶, dans ce cas il s'agit plutôt de micro-simulation.

L'archétype *Shifting the burden to the intervenor*

Nous proposons d'illustrer le rôle explicatif et pédagogique du modèle de simulation dans l'aide à la gouvernance des systèmes avec l'archétype *Shifting the burden to the intervenor*. Le comportement dynamique, résultant de la structure générique qui est présentée dans le diagramme ci-dessous, met en cause une recherche de performance de court terme qui se réalise au détriment d'une organisation efficace et durable sur le long terme. Ces objectifs de court terme peuvent aller jusqu'à entraîner un comportement d'addiction pouvant nuire et diminuer progressivement les facultés d'adaptation et de réorganisation du système.

Il faut distinguer sur ce diagramme trois boucles de rétroaction, deux sont négatives (B1 et B2) et la troisième est positive (R1) ; et surtout deux d'entre elles font intervenir des délais indiqués par le mot *Delay* sur les flèches concernées. Cette structure générique indique qu'une chute de performance du système étudié (quel qu'il soit) peut conduire à une intervention externe au système, avec pour objectif de préserver ou de maintenir son niveau de performance (B2) au plus vite.

Structure générique de l'archétype *Shifting the Burden to the Intervenor*



(d'après J.Sterman et R.Oliva, 2006, polycopié non publié)

Avant cette intervention, le système maintenait son fonctionnement grâce à des processus internes et à ses propres capacités. Cette intervention extérieure peut avoir une efficacité de court terme dans la mesure où elle ne permet pas de résoudre le problème réel à la base de la déficience constatée. Si tel est le cas, à moyen terme, cette intervention extérieure va progressivement réduire les capacités internes du système à remédier à son problème de fond, à se réorganiser, et le rendre à chaque fois un peu plus dépendant de cette intervention extérieure. À titre d'illustration, dans une organisation industrielle, il peut s'agir par exemple de réparations réalisées dans l'urgence, mobilisant toutes les ressources humaines. Si elles se succèdent trop souvent, elles empêchent de

⁶ Voir notamment *From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modelling: Reasons, Techniques, Tools* (Borshchev and Filippov, 2005)

réaliser et d'organiser les opérations de maintenance et de prévention indispensables, qui peuvent pourtant être le remède à ces pannes intempestives. Cette baisse des activités préventives qui manquaient déjà d'efficacité, aggrave peu à peu la situation à terme en conduisant à une augmentation du nombre de pannes. Mais surtout le système devient complètement dépendant de ces interventions d'urgence, et plus aucune ressource n'est allouée à une véritable réorganisation préventive.

Mais la boucle B1 indique qu'il existe une alternative à cette spirale négative, un travail sur le problème de fond à l'origine de cette baisse de performance. Cependant, le délai dans cette boucle pourra avoir pour conséquence de retarder les effets de ce travail sur l'amélioration du système. Les simulations de ce type d'archétype peuvent conduire ainsi à des situations qui, en raison de ce délai, seront dans un premier temps *pires* avant de devenir *meilleures*. Mais lorsque différentes hypothèses sont simulées et permettent de trouver les solutions à cette spirale négative, le fait de savoir et de comprendre pourquoi une situation peut se détériorer avant de s'améliorer est essentiel... Bien évidemment, un tel archétype prend toujours place dans des structures plus larges, et constitue des boucles parmi d'autres, les simulations du système deviennent alors un support d'aide à la compréhension du fonctionnement et de l'évolution de l'ensemble du système.

Le plus souvent cet archétype est identifié lorsqu'un comportement problématique, correspondant à cette structure, a été mis en exergue ; il peut s'appliquer à de nombreuses disciplines. Il aide à une compréhension des mécanismes sous-jacents à l'émergence de ces comportements, et surtout la finalité des simulations est de tester des mesures, ou un ensemble de mesures, qui permettraient d'enrayer cette spirale négative.

Conclusion

Les modèles de dynamique des systèmes ont parfois été considérés comme des outils de prévision, à tort. Leur vocation est avant tout explicative et pédagogique, les boucles de rétroaction, les délais, les relations non linéaires sont autant d'éléments qui peuvent conduire à des évolutions complexes. L'outil de simulation est là pour aider à en comprendre le fonctionnement, à tester des scénarios pour des futurs possibles (prospective notamment), des mesures pouvant aider à enrayer des mécanismes pernicioseux, etc. Il peut être considéré comme un outil d'aide à la gouvernance des systèmes, un support d'aide à la décision, interdisciplinaire.

Références

BORSHCHEV Andrei, FILIPPOV Alexei. 2005. *From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modelling : Reasons, Techniques, Tools*. St Petersburg : XJ Technologies, 2005. Poly. 22p.

CLERGUE Gérard. 1997. *L'apprentissage de la complexité*. Paris: Hermès, 1997. 159p.

FORRESTER Jay. 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge: MIT Press, 1961. 464p.

FORRESTER Jay. 1971. *World Dynamics*. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971. 144p.

FORRESTER Jay. 1989. *The Beginning of System Dynamics*. Banquet Talk at the International meeting of the System Dynamics Society, Stuttgart, Germany, 13 July, 1989. Cambridge: MIT, 1996. 16p. D-4561-1.

FORRESTER Jay. 1991. "System Dynamics and the Lessons of 35 years". In *The Systemic Basis of Policy Making in the 1990s*. 29 avril 1991. 35p. D-4224-4.

GACOGNE Valérie & CALZADA Christian. 1998. "Modélisation des systèmes de la filière Bois-papier-carton". Notes de Synthèse du SES, numéro 117, mai-juin 1998, Ministère de l'Équipement, La Défense.

GACOGNE Valérie. 2003. *Impact des coûts de transport sur les systèmes logistiques par une modélisation en dynamique des systèmes*. Paris: ENPC, juin 2003. 263p. Thèse pour le doctorat de transport.

GACOGNE Valérie. 2005. "Alternative Methodologies - Techniques", 2005 System Dynamics Conference reporting, *System Dynamics Newsletter*, Vol.18, n°4, October 2005.

GACOGNE Valérie. 2006. *Tendances logistiques, croissance de la mobilité des marchandises, et émissions de GES des véhicules*. Paris : ADEME, mars 2006.

MEADOWS Donella H. 1980. "The Unavoidable A Priori". In *Elements of the System Dynamics Method*. Cambridge: Productivity Press, 1980. pp.23-57.

MEADOWS Donella H., MEADOWS Dennis H. & RANDERS Jorgen. 1992. *Beyond The Limits*. London: Earthscan, 1992. 300p.

PAULRE Bernard. 1998. "La dynamique des systèmes, quarante ans après". In *La dynamique des systèmes*. Paris: Hermès, 1998. pp.16-24.

STERMAN John D. 2000. *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. USA: McGraw-Hill, 2000. 982p.