

# **DYNAMIQUE DES AFFAIRES**

**By John D. Sterman**

**Copyright © 2000**

**Published by Irwin McGraw Hill**

**This material is reproduced with permission of  
The McGraw-Hill Companies.**

## **Préface**

Les mutations économiques, technologiques, sociaux et environnementaux rapides, posent des défis aux dirigeants et décideurs politiques à apprendre de plus en plus vite, pendant qu'au même moment la complexité des systèmes dans lesquels nous vivons s'accroît. Beaucoup de problèmes que nous rencontrons se posent comme des effets secondaires de nos propres actions passées. Le plus souvent les politiques que nous mettons en oeuvre à résoudre d'importants problèmes échouent, aggravant le problème ou créant d'autres problèmes.

La prise de décision efficace et l'apprentissage dans un monde de complexité dynamique croissant nous exige d'être des penseurs de systèmes – pour étendre les limites de nos modèles mentaux et pour élaborer des outils pour comprendre la manière dont la structure des systèmes complexes façonne leur comportement.

Le présent livre vous initie à la modélisation de la dynamique de système pour l'analyse de la politique et de la stratégie, en mettant l'accent sur les applications politiques publiques et commerciales. La dynamique de système est une perspective et un ensemble d'outils conceptuels nous permettant de comprendre la structure et la dynamique des systèmes complexes. La dynamique du système est aussi une méthode de modélisation rigoureuse qui nous permet de créer des simulations formelles d'ordinateur des systèmes complexes qui servent à concevoir des politiques et organisations plus efficaces. Ensemble, ces outils nous permettent de créer des simulateurs de vol de gestion – les micro-mondes où l'espace et le temps peuvent être compressés et ralentis pour nous permettre de prendre connaissance avec les effets secondaires à long termes des décisions, les formations accélérées, de développer notre compréhension des systèmes complexes, et de créer des structures et stratégies pour une meilleure réussite.

Le domaine de la dynamique de système est en plein essor. Durant la dernière décennie, plusieurs grandes sociétés, cabinets de consultations, et organisations gouvernementales utilisent la dynamique de système pour trouver des solutions aux problèmes critiques. Plusieurs universités et écoles de commerce innovatrices enseignent la dynamique de système et trouvent un nombre croissant d'étudiants enthousiastes qui s'inscrivent. Des centaines d'écoles primaires et secondaires, du jardin d'enfants à l'école supérieure, introduisent des systèmes de pensée sur les systèmes, la dynamique de système et la simulation d'ordinateur dans leur programmes. Les outils et méthodes de modélisation de la dynamique du système, la bibliothèque d'applications réussies et les compréhensions dans l'utilisation efficace des outils avec les cadres et les organisations s'épanouissent rapidement.

## Caractéristiques Et Matières

Les textes universitaires, particulièrement ceux axés sur les applications des politiques publiques et commerciales, n'ont pas maintenu le rythme de la croissance de ce domaine. Ce livre vise à fournir une couverture complète du domaine de la dynamique du système aujourd'hui, en analysant :

- La vision mondiale sur la pensée sur les systèmes et la dynamique de système;
- Les outils sur la pensée sur les systèmes, y compris les méthodes servant à expliquer et à trouver la structure des systèmes complexes et à relier ces structures à leurs dynamiques ;
- Les outils de modélisation et de simulation des systèmes complexes ;
- Les procédures d'analyse et d'amélioration de modèles ;
- Les directives de travail avec les équipes de clients et la mise en œuvre réussie.

Vous aurez des informations sur les dynamiques des systèmes complexes, notamment les structures qui créent la croissance, le comportement visant à atteindre des objectifs, l'oscillation et l'instabilité, la croissance en forme de S-, dépassement et chute ; dépendance du chemin, et d'autres dynamiques non linéaires. Les exemples et applications comprennent

- Croissance d'entreprise et stagnation,
- diffusion de nouvelles technologies,
- Les dynamiques des maladies infectieuses telles que le VIH/SIDA,
- Le cycle des affaires
- Les bulles spéculatives,
- L'utilisation et la fiabilité des prévisions,
- La conception de chaînes de distribution dans les affaires et d'autres organisations
- Gestion du service de qualité,
- La politique de transport et la congestion de la circulation,
- La gestion du projet et développement du produit,

et beaucoup d'autres.

Le but des systèmes de pensée et de la modélisation de la dynamique de système est de renforcer notre compréhension des manières par lesquelles la prestation d'une organisation est liée à sa structure interne et ses politiques de fonctionnement, y compris celles des clients, des concurrents, et des fournisseurs et ensuite utiliser cette compréhension pour créer des politiques à fort effet de levier pour la réussite. Pour ce faire, le livre utilise :

- **Les points de processus** qui fournissent des conseils pratiques pour l'application réussie des outils dans les organisations réelles.
- Les études de cas de **la Dynamique de Système en Action** qui présentent des applications réussies allant du réchauffement de la planète à la guerre contre la drogue à la reprise de l'ingénierie de la chaîne d'approvisionnement d'une grande société informatique, la stratégie du marketing dans l'industrie d'automobile, et le processus d'amélioration dans l'industrie pétrochimique.

La dynamique de système n'est pas un sport de spectateurs. L'élaboration de la pensée sur les systèmes et les techniques de modélisation exigent la participation active, de vous, le lecteur, à travers

- **Les défis.** Les défis, mis dans le texte, vous offrent des exercices à faire avec les outils et les techniques présentés dans le document et vont stimuler votre pensée initiale au sujet d'importants problèmes du monde réel. Les défis vont des expérimentations de la pensée ordinaire aux projets de modélisation à grande échelle.
- **Le logiciel de simulation et modèles.** Le CD-ROM et le site web d'accompagnement (<http://www.mhhe.com/sterman>) contient tous les modèles élaborés dans le texte avec le logiciel de simulation de pointe servant à les faire exécuter. Il y a plusieurs paquets de logiciels créés pour appuyer la modélisation de la dynamique du système. Ceux-ci sont ithink, Powersim, et Vensim. Le CD et le site web incluent les modèles du texte dans les formats des trois logiciels. Le disque aussi contient les versions complètes opérationnelles des logiciels ithink, Powersim, et Versim pour vous permettre d'exécuter les modèles en utilisant l'un de ces progiciels sans avoir à acheter tout autre logiciel supplémentaire.
- En plus, le **Manuel d'utilisateur** et la section utilisateur du **site web** contient des solutions proposées pour les défis, d'autres instructions, les fichiers Powerpoint avec les diagrammes et les chiffres à partir du texte conçus pour les transparents, les séquences de cours proposées, les programmes et d'autres matériels.

## Publique Cible

Le présent livre peut être utilisé comme manuel sur les pensées sur les systèmes, la modélisation de la simulation, la complexité, la pensée stratégique, les opérations et les l'ingénierie industrielle, entre autres. Le manuel peut être utilisé dans les cours de semestre pleins ou dans les cours de demi semestres, l'éducation exécutive et l'autodidactie. Le livre sert aussi de référence pour les directeurs, les ingénieurs, les consultants et d'autres personnes intéressées à l'élaboration de leurs techniques de pensée sur les systèmes à l'utilisation de la dynamique de système dans leurs organisations

## Une Note Sur Les Mathematiques

La dynamique de système est basée sur une méthode de contrôle de la théorie et la théorie moderne de la dynamique non linéaire. Il y a une fondation mathématique rigoureuse et solide pour la théorie et des modèles que nous élaborons. La dynamique de système est aussi conçu pour servir d'outil concret que les décideurs peuvent utiliser pour résoudre les problèmes auxquels ils sont confrontés dans leurs organisations. La plus part des gestionnaires ou cadres de direction n'ont pas étudié les équations différentielles non linéaires ou même le calcul, ou l'ont oublié s'ils l'avaient étudié. Pour être utile, la modélisation de la dynamique de système doit être accessible à la plus grande partie des étudiants et directeurs pratiquants sans pour autant être un ensemble flou d'outils qualitatifs et de généralisations non fiables. Cette tension est aggravée par la diversité des formations au sein de la communauté de directeurs et cadres, d'étudiants, et les intellectuels qui s'intéressent à la dynamique des systèmes, les formations académiques vont des personnes qui n'ont pas étudié la mathématique au delà du lycée à ceux qui ont le doctorat en physique.

## Si Vous N'avez Pas Une Formation Solide En Mathematique, N'ayez Pas Peur

Ce livre présente la dynamique de système avec un minimum de formules mathématiques. Le but est de développer votre intuition et votre compréhension conceptuelle, sans sacrifier la rigueur de la méthode scientifique. On n'a pas besoin de calcul ou d'équations différentielles

pour comprendre le matériel. En fait, les concepts sont présentés seulement en utilisant le texte, les FIGURES et l'algèbre de base. Les détails mathématiques et les références sur des matériels plus perfectionnés sont mis à part dans des sections séparées et les bas de pages. Les mathématiques supérieures, bien qu'utiles, ne sont pas aussi importantes que les techniques de pensée élaborées ici.

## **Si Vous Avez Une Connaissance Solide En Mathematique, N'ayez Pas Peur**

Les modèles réalistes et utiles sont presque toujours d'une telle complexité et non linéarité qu'il n'y a pas de solutions analytique connues, et beaucoup d'outils mathématiques que vous avez étudiés sont limités en matière d'applicabilité. Ce livre vous aidera dans l'utilisation de votre connaissance technique solide pour développer votre intuition et compréhension conceptuelle de la complexité et de la dynamique. La modélisation du comportement humain diffère de la modélisation physique en ingénierie et les sciences. Nous ne pouvons pas mettre les directeurs sur les tables de laboratoire et faire des expérimentations pour déterminer leur fonction de transfert ou fréquence de réponse. Nous pensons que tous les électrons suivent la même loi en physique, mais nous ne pouvons pas supposer que tout le monde se comporte de la même façon. En plus d'une base solide en mathématique de la dynamique du système, les systèmes de la modélisation humaine nous appellent à développer notre connaissance de la psychologie, de la prise de décision et du comportement organisationnel. Enfin, l'analyse mathématique, bien que nécessaire, est loin d'être suffisante pour les systèmes de pensée et de modélisation réussis. Pour que votre travail ait un effet dans le monde réel vous devez apprendre comment développer et mettre en œuvre les modèles de comportement humain dans les organisations, dans toute leur ambiguïté, la pression de temps, les personnalités et les politiques. A travers le livre, j'ai pensé à illustrer comment les outils techniques et les concepts mathématiques que vous avez pu étudié dans les sciences ou l'ingénierie peuvent être appliquées dans le monde complexe du décideur de politique.

## **Reaction**

Vos commentaires, critiques et suggestions sont les bienvenus. Nous vous invitons à nous proposer d'autres exemples, cas, théories, modèles, simulateurs de vols etc... pour rendre le présent livre plus pertinent et utile pour vous. J'actualiserai le siteweb pour intégrer les contributions et les nouveaux matériels de l'utilisateur. Les courriers électroniques seront adressés au [BusDyn@mit.edu](mailto:BusDyn@mit.edu).

## **Remerciements**

Ce travail est le fruit des conseils, critiques et encouragements de plusieurs collègues, étudiants et camarades. Mes reconnaissances illimitées vont à l'endroit de mes premiers professeurs de la dynamique de systèmes Dana Meadows, Denis Meadows, et Jay Forrester, pour leur intégrité, leurs standards élevés et engagement passionnant. Je suis particulièrement reconnaissant envers les étudiants exceptionnels de l'Ecole de Gestion MIT Sloan. Ils me défient constamment afin de rendre la dynamique du système pertinente, utile et attirante ; j'espère qu'ils ont appris de moi autant que j'ai appris d'eux. En plus, je remercie mes collègues de l'Ecole Sloan et dans la communauté de la dynamique du système dans le monde, qui ont aidé en fournissant des données et exemples, réviser le projet, analyser les premières versions dans leurs cours, et d'autres manières sans cesse. Ce groupe comprend (mais pas exhaustive) les personnes et institutions suivantes :

## Acknowledgments

This work benefited immensely from the advice, criticism, and encouragement of many colleagues, students, and friends. I owe an immeasurable debt to my first system dynamics teachers, Dana Meadows, Dennis Meadows, and Jay Forrester, for their integrity, high standards, and passionate commitment. I'm particularly indebted to the exceptional students of the MIT Sloan School of Management. They constantly challenge me to make the discipline of system dynamics relevant, useful, and exciting; I hope they've learned as much from me as I've learned from them. In addition, I thank my colleagues at the Sloan School and in the system dynamics community around the world, who helped by providing data and examples, reviewing the draft, testing early versions in their courses, and in countless other ways. This group includes (but is not limited to) the following folks and institutions:

Tarek Abdel-Hamid (Naval Postgraduate School); David Andersen, George Richardson (SUNY Albany); Ed Anderson (Univ. of Texas); Carlos Ariza, Sharon Els, Ken Cooper, Jim Lyneis, Hank Taylor (Pugh-Roberts Associates); George Backus (Policy Assessment Corporation); Bent Bakken (Norwegian Defense Research Establishment); Yaman Barlas (Bogazici University, Istanbul); Michael Bean (Powersim Corp.); Eric Beinhocker, Damon Beyer, Andrew Doman, Usman Ghani, Maurice Glueksman, Paul Langley, Norman Marshall (McKinsey and Company); Laura Black, John Carroll, Vanessa Colella, Ernst Diehl, Steve Eppinger, Charlie Fine, Mila Getmansky, Paulo Goncalves, Janet Gould Wilkinson, Jim Hines, Nan Lux, Brad Morrison, Tim Nugent, Nelson Repenning, Ed Roberts, Scott Rockart, George Roth, Ed Schein, Peter Senge (MIT); Allen and Jane Boorstein; Steve Cavaleri (Central Connecticut State Univ.); Geoff Coyle (Royal Military College of Science, UK, retired); Brian Dangerfield (Univ. of Salford); Pal Davidsen (Univ. of Bergen); Jim Doyle, Mike Radzicki, Khalid Saeed (Worcester Polytechnic Institute); Bob Eberlein, Tom Fiddaman, Dan Goldner, David Peterson, Laura Peterson (Ventana Systems); David Foley and Judy Berk; Andy Ford (Washington State Univ.); David Ford (Texas A&M University); Nathan Forrester (A. T. Kearney); Rich Goldbach (Metro Machine Corp.); Christian Haxholdt, Heather Hazard (Copenhagen Business School); Jack Homer (Homer Consulting); Jody House (Oregon Graduate Institute); Bill Isaacs (Dialogos); Sam Israelit (Arthur Andersen); Nitin Joglekar (Boston Univ. School of Management); Drew Jones (Sustainability Institute); Christian Kampmann, Erik Mosekilde (Technical Univ. of Denmark); Daniel Kim, Virginia Wiley (Pegasus Communications); Craig Kirkwood (Arizona State Univ.); Elizabeth Krahmer Keating (Northwestern Univ.); Don Kleinmuntz (Univ. of Illinois, Urbana-Champaign); David Kreutzer (GKA, Inc.); Robert Landel (Darden School of Business, Univ. of Virginia); David Lane (London School of Economics); Erik Larsen (City University, London); Winston J. Ledet, Winston P. Ledet (The Manufacturing Game, Inc.); Ralph Levine (Michigan State Univ.); Angela Lipinski (Society for Organizational Learning); Martin GroBmann, Frank Maier, Peter Milling (Univ. of Mannheim, Germany); Ali Mashayekhi (Sharif Univ. of Technology, Teheran); Nathaniel Mass (GenCorp); Paul Monus (BP/Amoco), John Morecroft, Ann van Ackere, Kim Warren (London Business School); Erling Moxnes (Norwegian School of Economics and Business Administration); Rogelio Oliva (Harvard Business School); Mark Paich (Colorado College); Steve Peterson, Barry Richmond (High Performance Systems); Greg Petsch (Compaq Computer); Nick Pudar (General Motors); Jack Pugh, Julia Pugh, Roberta Spencer (System Dynamics Society), Jorgen Randers (World Wildlife Fund International); Nancy Roberts (Leslie College); Jenny Rudolph (Boston College); Jorge Rufat-Latre (Strategos); Anjali Sastry, Marshall van Alstyne (University of Michigan); Bob Stearns; Susan Sterman; Jim Thompson (Global Prospectus, LLC); John Voyer

Les remerciements distingués aux Systèmes de Performance Supérieur, Powersim, SA, et les Systèmes Ventana-et leur grand peuple- d'avoir fourni leur logiciel de simulation et les traductions de modèles pour le CD et le siteweb.

L'équipe Irwin/McGraw-Hill mérite une mention spéciale pour leur enthousiasme, patience et aide éditorial, particulièrement Scott Isenberg, Carol Rose, Jeff Shelstad, et Gladys True.

Cara Barber et Kelley Donovan ont fourni un appui important en travaux de secrétariat. Kathy Sullivan est allé au-delà de la tâche demandée sur les recherches dans les bibliothèques, la collecte de données, les modifications éditoriales et les FIGURES.

Enfin, l'amour et le soutien de ma famille ont été constants et essentiels. Merci Cindy, David, et Sarah.

Préface .....	1
Caractéristiques Et Matières.....	2
Publique Cible .....	3
Une Note Sur Les Mathematiques .....	3
Si Vous N'avez Pas Une Formation Solide En Mathematique, N'ayez Pas Peur .....	3
Si Vous Avez Une Connaissance Solide En Mathematique, N'ayez Pas Peur.....	4
Reaction.....	4
Remerciements .....	4
Acknowledgments.....	5
Chapitre I.....	10
Comment apprendre à l'intérieur et au sujet des systèmes complexes .....	10
1.1 Introduction .....	10
1.2 L' apprentissage est un processus de réaction.....	20
1.3 Barrières A L'Apprentissage.....	25
1.3.1. Complexité de la dynamique.....	27
1.3.2 Informations Limitees .....	30
1.3.3. Confusion des variables et de l' ambiguïté .....	32
1.3.4 Rationalité Limitée et les Mauvaises Perceptions de la Réaction .....	33
1.3.5 Cartes cognitives défectueuses.....	35
1.3.6. Dédutions erronées à propos des Dynamiques.....	36
1.3.7. Raisonnement non-scientifique : Erreurs de Jugement et partialités .....	37
1.3.8. Routines défensives et Obstacles interpersonnels à l'apprentissage.....	39
1.3.9. Echec de la Mise en Œuvre .....	40
1.4 Exigences Pour Un Apprentissage Réussi Dans Les Systemes Complexes .....	40
1.4.1 Amélioration du processus d'apprentissage: les vertus des mondes virtuels.....	41
1.4.2 Les pièges des mondes virtuels .....	43
1.4.3 Pourquoi la simulation est essentielle .....	44
1.5 Resume .....	46
La Dynamique des Systèmes en Action.....	47
2.1 Applications De La Dynamique Des Systemes.....	48
2.2 Strategie De Location D'automobiles : Partis Aujourd'hui, De Retour Demain <sup>2</sup> .....	48
2.2.1 Theorie Dynamique.....	50
2.2.2 Elaboration Du Modele .....	55
2.2.3 Analyse de Politique.....	58
2.2.4 Impact et Suivi .....	61

2.3 A Temps Et Dans Les Limites Du Budget : La Dynamique De La Gestion De Projet 5	64
2.3.1 La réclamation.....	65
2.3.2 Elaboration du Modèle Initial .....	66
2.3.3 Hypothèse Dynamique .....	67
2.3.4 Le Processus de Modélisation .....	70
2.3.5 Impact Continu .....	73
2.4 Jouer Le Jeu De La Maintenance 12 .....	75
2.4.1 Hypothèse Dynamique .....	76
2.4.2 Le Défi de la Mise en Œuvre .....	82
2.4.3 Résultats .....	85
2.4.4 Transférer l'Apprentissage: l'Expérience de Lima .....	86
3.1 Le But De La Modelisation : Les Responsables Comme Concepteurs De L'organisation	91
3.2 Le Client Et Le Modelisateur .....	92
3.3 Les Etapes Du Processus De Modelisation .....	93
3.4 La Modelisation Est Iterative .....	95
3.5. REVUE DU PROCESSUS DE MODELISATION .....	97
3.5.1 Definition Du Probleme : L' Importance Du But .....	97
Modes de Références .....	98
Période de temps .....	98
3.5.2 Formuler une hypothèse Dynamique .....	102
Explication Endogène .....	103
La Structure du Système d'Etablissement de Carte .....	104
La charte des frontières du modèle. ....	105
3.5.3 Formulation d'un Modèle de Simulation .....	111
3.5.4 Le Test.....	111
3.5.5. Conception de Politique et évaluation.....	112
3.6 Résumé .....	113

Figure 1-1 .....	12
Figure 1-2 .....	14
Figure 1-3 .....	16
Figure 1-4 .....	17
Figure 1-5 .....	19
Figure 1-6 .....	20
Figure 1-7 .....	21
Figure 1-8 .....	22
Figure 1-9 .....	23
Figure 1-10 .....	24
Figure 1-11 .....	25
Tableau 1-2 .....	26
Figure 1-12 .....	27
Tableau 1-3 .....	28
Tableau 1 – 4 : .....	35
Figure 1-13 .....	38
Figure 1-14 .....	42
Figure 2-1 .....	52
Figure 2-2 .....	57
Figure 2-3 .....	59
Figure 2-4 .....	60
Figure 2-5 .....	62
Figure 2-6 .....	67
Figure 2-7 .....	69
Figure 2-8 .....	77
Figure 2-9 .....	78
Figure 2-10 .....	80
Table 2-1 .....	82
Figure 2-11 .....	85
Tableau 2-2 .....	87
Figure 3-1 .....	95
Figure 3-2 .....	96
Figure 3-3 .....	99
Figure 3-4 .....	100
Figure 3-5 .....	101
Table 3-2 .....	105
Figure 3-6 .....	107
Figure 3-7 .....	108
Figure 3-8 .....	110



## **Gestion**

**Sterman** . *Dynamique des Affaires* : La pensée sur les systèmes et la modélisation pour un monde complexe.

### **I. Perspective et processus**

1. Apprendre des systèmes complexes
2. la dynamique des systèmes en action
3. Le processus de la modélisation

### **1eme partie :**

#### **Perspective et Processus**

La présente section présente la vision mondiale de la dynamique des systèmes ainsi que le processus de l'utilisation de la dynamique des systèmes pour la résolution de problèmes dans la vie quotidienne. Le Chapitre 1 présente une vue d'ensemble des caractéristiques des systèmes complexes et offre les raisons pour lesquelles il est si difficile d'apprendre étant à l'intérieur de systèmes d'une grande complexité dynamique. Le chapitre 2 présente trois études de cas qui montrent comment de grandes sociétés ont pu réussir l'utilisation de la dynamique des systèmes pour résoudre des problèmes pressants de l'entreprise.

Le chapitre 3 décrit le processus d'utilisation de la dynamique des systèmes dans plus de détails tout en soulignant comment les modélisations et les clients travaillent ensemble pour atteindre des résultats. Le chapitre 4 offre une présentation qualitative de la théorie de la dynamique en montrant les principales tendances de comportement que produisent les systèmes dynamiques et en présentant les structures de réaction qui sous-tendent ces comportements.

# Chapitre I

## Comment apprendre à l'intérieur et au sujet des systèmes complexes

### 1.1 Introduction

La constante majeure des temps modernes est le changement. Les changements accélérés dans les domaines de la technologie, de la population et des activités économiques ont eu des effets prosaïques – à travers l'effet de la technologie de l'information sur la manière dont on utilise le téléphone- et des effets profonds – à travers ceux des gaz à effet de serre sur le climat mondial. Certains de ces changements sont merveilleux d'autres souillent la planète, appauvrissent l'esprit humain et menacent notre survie. Tous ces changements remettent en cause les institutions traditionnelles, les pratiques et croyances. Mieux encore, la plupart des changements que nous nous évertuons à comprendre sont des conséquences voulues ou non voulues de l'humanité elle-même. Le plus souvent, les efforts bien intentionnés visant à trouver des solutions aux problèmes pressants suscitent *une résistance aux politiques*, de la part d'autres personnes ou de la nature, résistance dont les réactions inattendues retardent, diluent et font échouer nos politiques. Dans beaucoup de cas, nos efforts visant à résoudre un problème ne font que l'empirer.

Les effets vertigineux du changement accéléré ne sont pas nouveaux. Henry Adams, un observateur attentif des mutations causées par la révolution industrielle a formulé la Loi de l'Accélération pour décrire la croissance exponentielle de la technologie, de la production et de la population qui ont fait perdre à l'héritage de l'Amérique coloniale sa raison d'être :

Depuis l'année 1800, des dizaines de nouvelles forces avaient été découvertes ; d'anciennes forces avaient été promues à des pouvoirs plus élevés...la complexité s'est étendue des horizons plus éloignés, et les ratios arithmétiques n'étaient plus d'aucune utilité pour tenter d'atteindre l'exactitude.

Si la science devait continuer à doubler ou à quadrupler ses complexités chaque 10 années, même les mathématiciens devraient bientôt succomber. Un esprit moyen avait déjà succombé en 1850 ; et ne pouvait plus comprendre le problème en 1900.

(Adams 1918, pp 490,496).

Adams estimait que les changements radicaux de la société causés par ces forces " nécessiteraient l'acquisition d'un nouvel esprit social" avec un optimisme atypique, peut être ironique il conclut, "Jusqu'ici, depuis 5 ou 10 mille ans l'esprit avait bien réagi et rien ne prouvait qu'il n'arriverait pas à réagir- mais aussi faudra t-il qu'il fasse un saut."

Depuis lors, tout une foule de philosophes, de scientifiques et de gourous du management ont abondé dans le même sens que Adams en se lamentant de l'accélération et en appelant à faire des bonds similaires préconisés pour parvenir à des manières fondamentalement nouvelles de penser et d'agir. Plusieurs personnes préconisent la mise au point de la *pensée sur les systèmes* -

La capacité de voir le monde comme un système complexe dans lequel nous comprenons qu'il nous suffit plus " de faire une seule chose " et " que tout est lié ". Nous pensons que si les gens avaient une vision holistique du monde, ils agiraient selon les intérêts à long terme de

tout le système, ils identifieraient les points à fort effet de levier des systèmes et éviteraient ainsi la résistance aux politiques. En fait, pour certaines personnes, l'élaboration de la pensée sur les systèmes est d'une importance cruciale pour la survie de l'humanité.

Le défi auquel nous sommes confrontés est de savoir comment passer des généralisations portant sur l'apprentissage accéléré et sur la pensée sur les systèmes aux outils et processus qui nous aident à comprendre la complexité, à concevoir de meilleures politiques de fonctionnement et à guider les changements à l'intérieur des systèmes aux niveaux des petites entreprises et de la planète tout entière. Toutefois, réaliser l'étude des systèmes complexes lorsqu'on y vit est difficile. Nous sommes tous des passagers à bord d'un avion que nous devons non seulement piloter mais concevoir de nouveau au cours du vol.

La dynamique des systèmes est une méthode visant à renforcer l'apprentissage tout en étant dans les systèmes complexes. Tout comme une compagnie aérienne utilise les simulateurs de vol pour permettre aux pilotes d'apprendre à piloter, la dynamique de systèmes constitue en partie une méthode servant à mettre au point les simulateurs de vol de management à travers entre autres, les modèles de simulations informatiques pour nous aider à comprendre la complexité dynamique, les sources de résistance aux politiques et à concevoir des politiques plus efficaces.

Mais l'étude des systèmes dynamiques complexes requiert plus que des outils techniques pour la mise au point de modèles mathématiques. La dynamique des systèmes est fondamentalement inter-disciplinaire. Puisque nous sommes intéressés au comportement des systèmes complexes, la dynamique de systèmes est enracinée dans la théorie de la dynamique non linéaire et dans le contrôle des réactions développés dans les mathématiques, la physique et l'ingénierie.

Le présent chapitre aborde les compétences requises pour réunir vos capacités sur la pensée sur les systèmes, expose la manière de créer un processus efficace d'apprentissage au sein des systèmes dynamiques complexes et la manière d'utiliser la dynamique des systèmes au sein des organisations pour résoudre d'importants problèmes. Dans un premier temps j'ai passé en revue ce que nous connaissons sur les manières dont les gens apprennent à l'intérieur et au sujet des systèmes dynamiques. Un tel apprentissage se réalise difficilement et rarement car une diversité d'obstacles structurels freinent les processus de réaction nécessaires à l'apprentissage. Les approches réussies pour l'apprentissage des systèmes dynamiques complexes requièrent (1) des outils pour faire ressortir et représenter les modèles mentaux, concevoir de nouvelles politiques et pratiquer de nouvelles compétences et (3) méthodes pour aiguïser les compétences de raisonnement scientifiques, améliorer les processus de groupes et surmonter les routines défensives des individus et équipes.

1

<sup>1</sup> Il existe beaucoup d'écoles de pensées (pour les enquêtes, voir Richardson 1991 et Lane 1994). Certains privilégient les méthodes qualitatives ; d'autres mettent l'accent sur la modélisation formelle. Comme sources de méthodes et de métaphore elles s'inspirent des champs aussi divers que l'anthropologie, la biologie, l'ingénierie, la linguistique, la psychologie, la physique et le Taoïsme et recherchent des applications dans d'autres champs divers. Tous sont cependant d'accord qu'une vision du monde basée sur les systèmes est plutôt rare. Jay Forrester a mis au point la dynamique des systèmes dans les années 1950 au MIT. Richardson (1991) retrace l'histoire de ce domaine et fait un lien entre la dynamique des systèmes et d'autres approches aux systèmes.

### 1.1.1. La Résistance aux politiques, la loi des conséquences non voulues et le Comportement contre- intuitifs des systèmes sociaux

*Et tout se passera comme la complication de maladies, et en appliquant un remède à une plaie cela provoque l'apparition d'une autre et ce qui soigne une plaie fait apparaître d'autres.....Sir Thomas More*

*Les plans les mieux élaborés des souris et des hommes ....échouent Robert Burns*

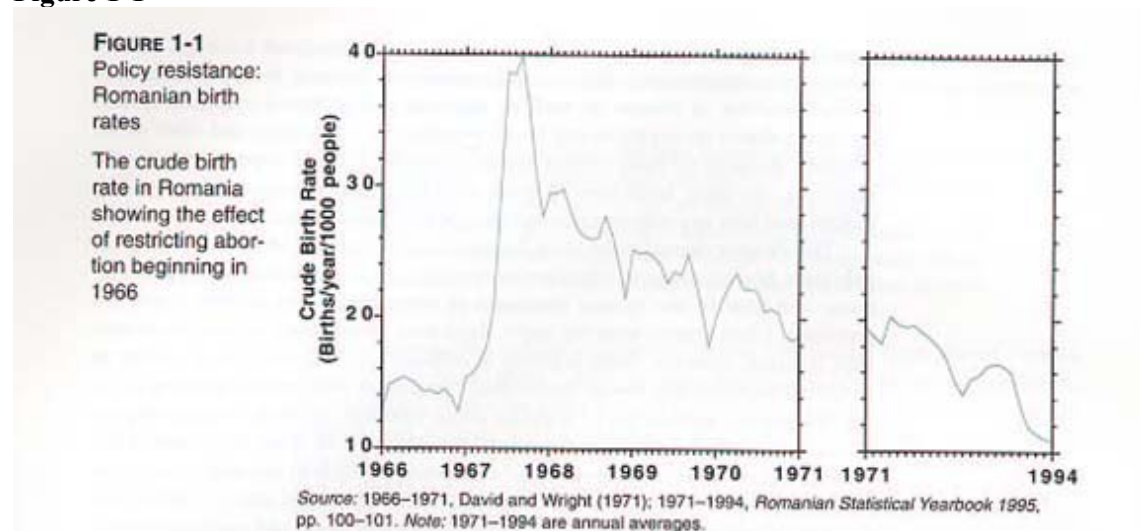
*Tout ce qui peut rater, ne peut qu'échouer*

*Murphy*

*Nous avons rencontré l'ennemi qui est nous mêmes.....Pogo*

De Thomas More en 1516 à Pogo au milieu du 20e Siècle il a été reconnu que lorsque des gens cherchent à résoudre un problème finissent par l'empirer. Nos politiques peuvent créer des effets secondaires imprévus. Nos tentatives visant à stabiliser le système peuvent au contraire le déstabiliser. Nos décisions peuvent provoquer des réactions chez les autres qui cherchent à rétablir l'équilibre que nous dérangeons. Forrester (1971a) appelle de tels phénomènes " le comportement contre-intuitif des systèmes sociaux". Ces dynamiques inattendues conduisent souvent à des résistances face aux politiques, à savoir la tendance pour les interventions de se voir retardées, diluées ou échouées en raison de la réponse au système face à l'intervention elle même (Meadows 1982).

**Figure 1-1**



A titre d'exemple, prenons le taux de naissances en Roumanie vers la fin des années 1960. Le taux brut des naissances (naissances par an pour 1000 personnes) était extrêmement faible- environ 15 pour 1000 (figure 1-1). Pour diverses raisons, notamment la fierté nationale et l'identité ethnique, le faible taux de naissances a été considéré comme un grave problème par le gouvernement et le dictateur Nicolau Ceausescu. Le régime Ceausescu a réagi en imposant des politiques visant à stimuler le taux des naissances. L'importation de produits contraceptifs était interdite ; les campagnes de propagandes vantant les vertus des grandes familles et le devoir patriotique (ou plutôt matriotique )d'avoir un plus grand nombre d'enfants a été introduit ainsi que certaines incitations modestes d'impôts en faveur des grandes familles. Plus important, l'avortement – librement disponible sur demande depuis 1957 à travers le système de soins de santé étatique- fut interdit en Octobre 1966 (David et wrigth 1971).

Le résultat fut immédiat et spectaculaire. Le taux des naissances est monté en flèche pour atteindre environ 40 pour 1000 par an, rivalisant avec ceux des nations dont la croissance sont parmi les plus rapides. La politique semblait être une réussite éclatante. Toutefois, au bout de quelques mois, le taux des naissances a commencé à chuter. A la fin de 1970, seulement 4 ans après l'application de la politique, le taux des naissances avait chuté en dessous de 20 pour mille proche des faibles niveaux enregistrés avant l'intervention. Bien que la politique se soit poursuivie en force, le taux des naissances a continué à reculer atteignant 16 pour 1000 en 1989- soit environ le même faible niveau qui a conduit à l'imposition de la politique. Qu'est ce qui s'est passé ?

Le système a réagit face à l'intervention d'une manière inattendue par le régime. Les populations de Roumanie ont trouvé des moyens de contourner la politique. Ils ont expérimenté des méthodes alternatives de contrôle des naissances. Il se sont mis à importer par contrebande des comprimés et produits contraceptifs en provenance de certains pays. Des femmes désespérées ont cherché et trouvé des moyens de faire des avortements clandestins. Dans beaucoup de cas ces opérations étaient réalisées dans des conditions non hygiéniques et bâclées ce qui a conduit au triplement des décès dus aux complications post avortements de 1965 à 1967. Plus grave encore, le nombre des décès néonataux augmente de plus de 300% entre 1966 et 1967, une augmentation de 20% du taux de mortalité infantile (David et Wright 1971). Le résultat : la politique est devenue totalement inopérante presque immédiatement après sa mise en application.

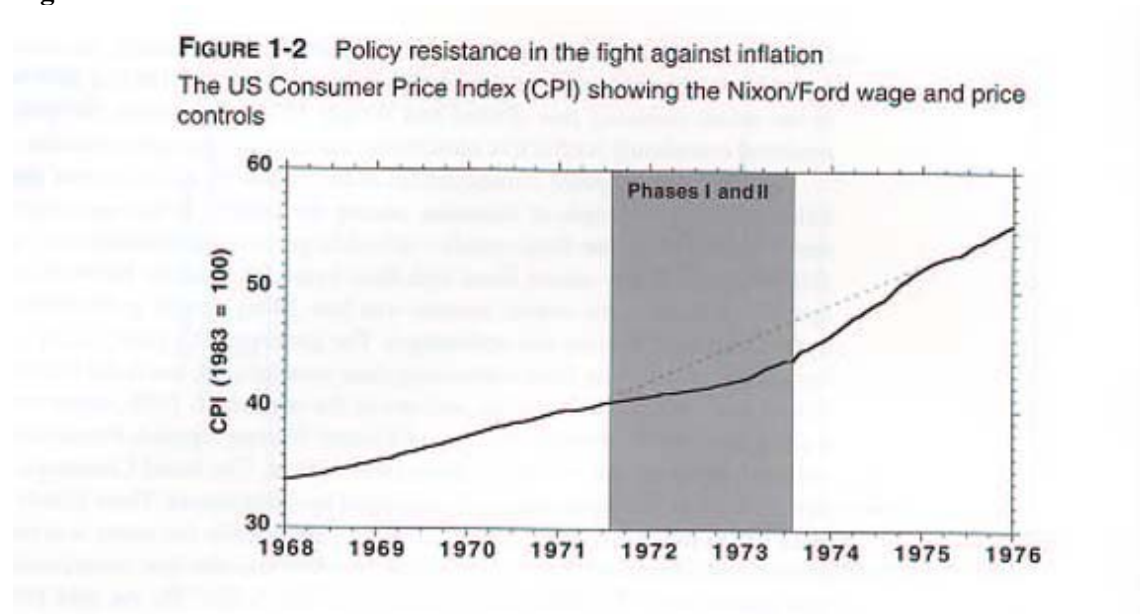
Mais les conséquences non prévues ne se sont pas limitées à l'échec de la politique de population. Les populations de Roumanie désiraient avoir des petites familles car elles n'avaient pas les moyens de s'offrir ou d'entretenir de grandes familles. Pour certaines de ces familles la garde et les soins aux enfants n'étaient pas disponibles. Beaucoup d'autres vivaient avec leurs grandes familles dans des petits appartements surpeuplés. Les emplois se faisaient rares, les revenus faibles. Beaucoup de personnes ont donné à des orphelinats publics, les enfants qu'ils ne pouvaient prendre en charge. La politique du Gouvernement n'a pas empêché les populations roumaines de contrôler leur propre fécondité mais elle a surtout créé un puissant ressentiment contre les politiques du régime considérées comme envahissantes. En 1989, lorsque le mur de Berlin est tombé ainsi que les régimes totalitaires d'Europe de l'Est, la Roumanie fut le seul pays où la révolution du velours fut violente. Le Président Ceausescu et son épouse tant haïs furent exécutés sommairement par les pelotons d'exécution. Leurs corps ensanglantés furent abandonnés dans la cour du Palais Présidentiel et les scènes de révolte furent montrées en direct à la TV. La loi interdisant l'avortement fut la première à être abrogée par le nouveau gouvernement. Le taux de naissances déjà faible s'est réduit davantage. Au milieu des années 90 la populations roumaine déclinait alors que le nombre des naissances diminuaient en deçà de celui des décès.

Les enfants de Roumanie ont le plus souffert de la politique de population. Du temps de la politique de population des milliers d'enfants ont été placés dans des orphelinats étatiques où ils furent parqués tels des animaux dans des cages sans considérations pour les besoins de base encore moins pour l'amour dont nous avons tous besoin et que nous méritons. La nourriture manquait à tel enseigne que les transfusions sanguines étaient opérées régulièrement en guise de suppléments alimentaires. Et comme les aiguilles étaient utilisées fréquemment, l'épidémie du SIDA s'est très vite répandue parmi les enfants. Les effets secondaires de l'échec de la politique de population ont jeté une ombre sur la santé et le bonheur de tout une nation, une ombre qui s'est étendue sur des générations.

La résistance aux politiques ne se limite pas aux dictateurs. Elle ne respecte pas non plus les frontières nationales, l'idéologie politique ou une époque historique. Prenons la lutte du gouvernement américain contre l'inflation au début des années 70. La Figure 1-2 montre l'indice des prix à la consommation des USA entre 1968 et 1976. Au début des années 1970 l'inflation s'est accéléré et l'administration Nixon a estimé qu'il était urgent d'agir. Bien qu'il soit Républicain, Nixon a choisi de mettre en oeuvre des contrôles de prix et des salaires. Une politique qui coûte chère. Une nouvelle bureaucratie fédérale, le conseil des Salaires de la Stabilité des prix fut créée pour la supervision des mesures de contrôles et de veiller à leur application. Le contrôle des prix et des salaires était considéré par beaucoup au sein du parti de Nixon comme frisant le socialisme, ce qui a coûté à Nixon un capital politique précieux. Au début, la politique a semblé marcher bien qu'avec quelques problèmes. Au cours de la soi-disante Phase I des mesures de contrôle, le taux de l'inflation a chuté de moitié.

L'administration a donc décidé d'assouplir les mesures. Dans la phase II, le Président Ford (qui a hérité du programme de Nixon) a lancé une campagne énergique comportant des **boutons**.....dénommés "Gagnons" ou " Vainquons l'inflation maintenant !" Peu d'observateurs s'attendaient à ce que ces **boutons** portant la mention "Gagnons" aient un effet et beaucoup savaient que l'inflation reviendrait à son taux d'avant le lancement des mesures. Au contraire, l'inflation se poursuivit. En 1975, l'indice des prix à la consommation est revenu à son niveau d'avant l'imposition des mesures de contrôle des prix. Moins de 4 ans après l'intervention il ne restait aucun résidu de bénéfice. D'autres exemples de résistance aux politiques se voient presque chaque jour dans les journaux. Tableau 1-1 montre une liste de quelques uns <sup>2</sup>

**Figure 1-2**



Machiavelli, un observateur attentif des systèmes humains a longuement abordé la question de la résistance aux politiques et a fait remarquer dans ses écrits que :

- Lorsque un problème se pose soit à l'intérieur d'une République ou en dehors, dû à des raisons internes ou externes, si ce problème est si grave que tout le monde en est inquiet, l'approche la plus sûre est de retarder toute action contre ce problème au lieu d'essayer de s'en débarrasser, car ceux qui essaient de s'en débarrasser ne font toujours que le renforcer et accélérer le mal qui pourrait en découler. (Machiavelli 1979, pp 240-242).

Je trouve le point de vue de Machiavelli trop cynique mais je sympathise avec ses frustrations à voir que ces clients princes (les PDG de la Renaissance d'Italie) prennent des actions qui empirent les problèmes. Une vision qui reflète cette position est donnée par le feu biologiste et essayiste Lewis Thomas (1974, p 90) :

- Lorsque vous êtes face à tout système social complexe tel qu'un centre urbain ou un village, comportant des aspects dont vous n'êtes pas satisfaits et que vous voulez corriger, vous ne pouvez pas tout de suite intervenir et vouloir corriger avec un espoir de réussite. Ceci constitue l'un des sujets de découragements de notre siècle... Vous ne pouvez vous mêler à une partie d'un système complexe de l'extérieur sans le risque certain de déclencher des événements désastreux dans d'autres parties éloignées auxquels vous ne vous attendiez pas. Si vous voulez corriger quelque chose vous devez d'abord comprendre ...tout le système...l'intervention est un moyen de causer des troubles.

**TABLEAU 1-1 : Exemples de résistance aux politiques**

- “ L’ Utilisation de médicaments bons marchés augmente et non diminue les prix selon l’étude : en limitant ce qui est prescrit comme dans les systèmes de soins les effets inattendus ont augmenté les coûts, selon les résultats ” (titre du LA Times 20/03/96, p.1 dans le rapport de l’Université de Utah portant sur 13.000 patients dans différents HMO).
- “Le plus grand programme de conservation qui paient aux fermiers des sommes pour ne pas cultiver certaines surfaces dans le cadre de la décennie contre l’érosion et l’aide de l’environnement est une perte d’argent, selon une nouvelle étude du programme créé il y a 11 ans...Pour chaque hectare frappé d’érosion que le fermier laisse non cultivé, un autre fermier parfois le même- se met à cultiver d’autres terres équivalentes se prêtant à l’érosion .. Dans les grandes plaines, par exemple, les fermiers ont mis de côté 17 millions d’hectares , et pourtant le total des terres cultivables a chuté de seulement 2 millions d’hectares” Business Week du 18/3/96 p 6 rapportant une étude de l’Université de Minnesota).
- Les cigarettes à faible teneur de goudron et de nicotine ne font que accroître l’absorption de carcinogènes , CO, etc car les fumeurs compensent la faible teneur en nicotine en fumant plus de cigarettes par jour, en tirant plus longuement et plus fréquemment sur leurs cigarettes et en gardant la fumée dans leur poumons plus longtemps.
- Les freins anti-verrouillage et autres appareils de sécurités de véhicules ont poussé d’autres personnes à rouler de manière plus agressive ce qui a contrebalancé certains de leurs avantages.
- La technologie de l’information n’a pas permis au bureau sans papier de se développer- la consommation de papier par habitant est en hausse.
- Les programmes de construction de routes n’ont pas pu décongestionner la circulation, celle ci s’est même accrue augmentant les retards et la pollution.
- Malgré l’utilisation répandue des appareils visant à réduire la main d’œuvre, les Américains jouissent de moins de loisirs aujourd’hui qu’il y a 50 ans.
- La guerre que mène le Gouvernement Américain contre la drogue qui s’appuie sur l’interdiction et l’interruption de l’approvisionnement ( en particulier la production de la cocaïne en Amérique du Sud) qui a coûté des milliards n’a eu qu’un impact limité sur la culture de la Cocaïne, sa production ou la contrebande du produit. L’usage de la drogue en Amérique et ailleurs reste élevé.
- La politique américaine de suppression des incendies a accru l’ampleur et la sévérité des feux de brousse. A la place des petits feux fréquents la politique de suppression des feux y a substitué une accumulation de bois morts et autres combustibles qui causent des feux plus grands et plus dangereux qui consomment les arbres les plus grands et anciens qui avaient survécu aux précédents feux sans dommages.
- Les efforts de lutte contre les crues et inondations sous forme de levées, et des barrages ont conduit à des inondations plus sévères en empêchant la dissipation naturelle du surplus d’eau dans les plaines inondées. Le coût des dégâts dus aux inondations s’est accru car les plaines inondables sont occupées par des personnes croyant qu’elles sont sécurisées
- L’imposition de la limite territoriale de 200 milles et des quotas pour la protection de stocks de poissons n’ont pas empêché l’effondrement de la société dénommée Georges Bank Fishery sur la cote Nord américaine. Autrefois, les plus riches du monde, mais dès les années 1990 plusieurs espèces ont disparu, la société de pêche a fermé ses portes, la flotte s’est immobilisée et les économies locales étaient en dépression.
- La de- réglementation de l’industrie des prêts et de l’épargne des USA visant à sauver le secteur de ses problèmes financiers a conduit à une vague de spéculation suivie de son effondrement à un coût s’élevant à des centaines de milliards de dollars.
- Les antibiotiques ont favorisé l’évolution de pathogènes résistants aux médicaments, y compris les souches virulentes de la Tuberculose, le mal de gorge, le staphylocoque et les maladies sexuellement transmissibles.
- Les pesticides et les herbicides ont stimulé l’évolution de ravageurs et d’herbes résistants mais ont éliminé les prédateurs naturels accumulant le long de la chaîne alimentaire des produits toxiques pour les poissons, les oiseaux et même les humains.

Mais comment peut on comprendre tout le système ? Comment se produit-elle la résistance aux politiques ? comment pouvons nous apprendre à l'éviter pour trouver les politiques à fort effet de levier qui peuvent produire un avantage durable ?

### 1.1.2. Causes de la résistance aux politiques

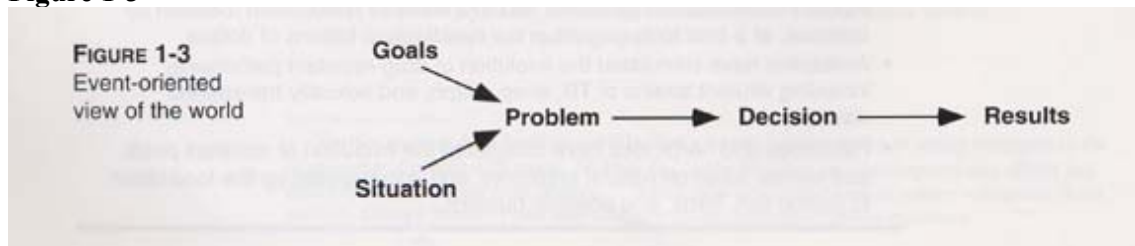
Une des causes de la résistance face aux politiques est notre tendance à interpréter l'expérience comme une série d'événements, par exemple, "le niveau des stocks est trop élevé" ou "les ventes ont chuté ce mois ci". Les récits de qui a fait quoi contre qui constituent les modes les plus fréquents du discours de la salle de courriers à la salle du Conseil d'Administration, des titres de journaux aux livres d'histoires. On nous enseigne que depuis notre jeune âge que chaque événement à une cause qui elle, constitue un effet d'une cause antérieure : "Le niveau des stocks est trop élevé parce que les ventes ont chuté de manière inattendue. Les ventes ont chuté parce que les concurrents ont réduit leurs prix. Les concurrents ont réduit leurs prix parce que ..." De telles explications événementielles peuvent s'étendre infiniment, selon une chaîne Aristotelienne non interrompue de causes et effets jusqu'à atteindre une Première Cause ou alors nous pouvons nous y désintéresser dans le processus.

Cette vision du monde axée sur les événements conduit à une approche axée aussi sur les événements pour la résolution des problèmes. La figure 1-3 montre comment nous essayons souvent de résoudre les problèmes. Nous évaluons la situation et la comparons à nos objectifs. L'écart entre la situation désirée et la situation perçue constitue notre problème. Par exemple, à supposer que les ventes de notre organisation soient de 80 millions \$ le dernier trimestre et que vos objectifs de vente soit 100 millions \$. Le problème est que les ventes sont de 20% moins que le niveau souhaité. Vous allez maintenant envisager diverses options pour corriger le problème. Vous pourrez diminuer vos prix pour stimuler la demande, accroître la part du marché, remplacer le Vice président en charge des ventes par quelqu'un de plus agressif, ou prendre d'autres actions. Vous choisissez l'option qui vous paraît la meilleure et vous l'appliquez pour (vous espérez) obtenir un meilleur résultat. Vous pourrez voir vos ventes augmenter : problème résolu. Ou semble t-il.

Le système a réagit à votre solution : alors que vos ventes progressent, vos concurrents réduiront leurs prix et donc vos ventes chuteront encore. Ainsi, la solution d'hier devient le problème d'aujourd'hui. Nous ne sommes pas des maîtres de marionnettes qui influencent un système se situant loin de nous. Nous sommes enracinés dans le système. Les mouvements du maître des marionnettes viennent en réaction à la position de la marionnette sur les ficelles. Il y a réaction : Les résultats de nos actions déterminent la situation à la quelle nous ferons face dans l'avenir. La nouvelle situation change notre évaluation du problème ainsi que les décisions que nous prendrons demain (voir la figure 1-4).

La résistance aux politiques se produit parce que nous ne comprenons pas toujours l'étendue des réactions qui s'opèrent dans le système (Figure 1-4). Pendant que nos actions altèrent l'état du système, d'autres personnes réagissent pour rétablir l'équilibre que nous avons dérangé. Nos actions peuvent également déclencher des effets secondaires.

**Figure 1-3**



Nous parlons généralement des effets secondaires comme si ils étaient des traits caractéristiques de la réalité. Ce n'est pas le cas. En réalité, il n'y a pas d'effets secondaires, il n'y a que des effets. Les effets que nous avons prévus ou qui sont bénéfiques sont les effets

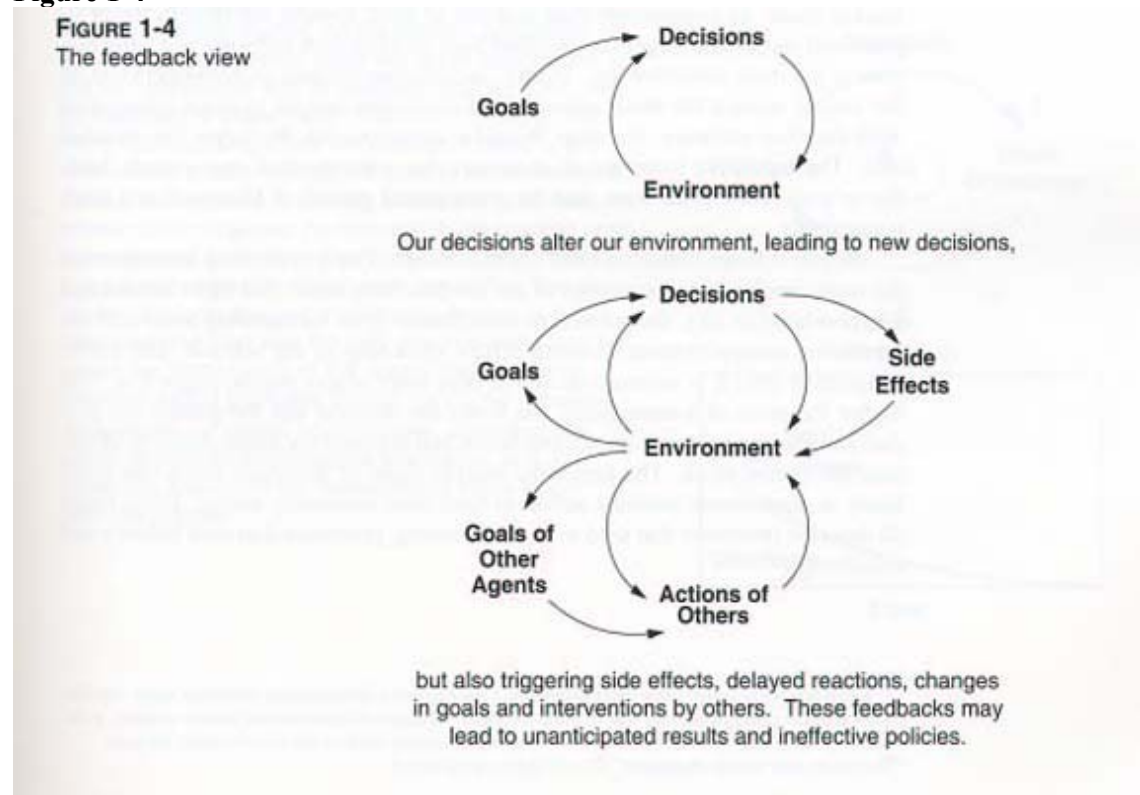


principaux et attendus. Les effets que nous ne prévoyons pas et qui ont un effet négatif sur notre politique, ceux qui ont nui au système sont ceux que nous prétendons être les effets secondaires. Les effets secondaires ne sont pas des effets caractéristiques de la réalité mais plutôt un signe que notre compréhension du système est étroite et défectueuse.

Les effets secondaires inattendus et non prévus se produisent parce que très souvent, nous agissons comme si les causes et effets sont toujours liés dans le temps et l'espace. Mais dans les systèmes complexes tels que les centres urbains, ou les hamsters (ou une entreprise, association ou un écosystème) les causes et effets sont souvent distants dans le temps et l'espace. Les frontières des modèles étroits conduisent souvent à des croyances qui violent la loi de la physique : au milieu des années 1990 la Californie et l'industrie automobile ont débattu de l'introduction des véhicules à émission zéro (ZEV) en vue de la réduction de la pollution de l'air. En effet, le (ZEV) ces véhicules électriques n'auraient pas de tuyaux d'échappement mais les centrales électriques requises pour produire l'électricité qui les font tourner émettent de la pollution. En réalité, la Californie faisait la promotion de l'adoption des véhicules DEV (Véhicules à émissions déplacées) dont les pollutions seraient emportées par le vent vers d'autres états ou accumulés dans des dépotoirs de déchets nucléaires hors de ses états. Les véhicules électriques pourraient se révéler être un gros avantage sur le plan environnemental par rapport à la combustion interne.

La technologie s'améliore rapidement, la pollution de l'air, elle, constitue un grand problème de santé dans plusieurs villes. Aucun mode de transport ou de processus de conversion d'énergie n'est sans impact environnemental, aucune législature ne peut abroger la 2<sup>e</sup> loi de la Thermodynamique.

**Figure 1-4**



Pour éviter toute résistance aux politiques et trouver des politiques influentes il nous faut étendre les limites de nos modèles mentaux afin de nous permettre d'être informé et de comprendre les implications des réactions issues des décisions que nous prenons. C'est à dire que nous devons étudier

et connaître la structure et la dynamique des systèmes de plus en plus complexes dans lesquels nous sommes ancrés.

### 1.1.3 Réaction

Une grande partie de l'art de la modélisation de la dynamique des systèmes consiste à découvrir et à représenter les processus de réaction qui, à l'instar des structures de stocks et des flux, des retards et des caractères non linéaires, déterminent les dynamiques d'un système. Vous pouvez imaginer qu'il y a une large gamme de différents processus de réactions à maîtriser pour pouvoir comprendre les dynamiques des systèmes complexes. En effet, les comportements les plus complexes proviennent des interactions (réactions) entre les composantes du système et non de la complexité des composantes elles mêmes.

Toutes les dynamiques sont issues de l'interaction entre seulement deux types de boucles de réaction, des boucles positives (qui s'auto renforcent) et négatives (qui s'auto corrigent) figure 1-5). Les <sup>2</sup>boucles tendent à renforcer ou à amplifier tout ce qui se passe dans le système. Plus l'OTAN déployait des armes nucléaires au cours de la guerre froide, plus l'Union Soviétique en fabriquait, amenant l'OTAN à en fabriquer davantage. Si une société réduit ses prix pour gagner sa part de marché, ses concurrents pourraient faire de même obligeant la société à davantage réduire ses prix. Plus la base du logiciel Microsoft installé est grande ainsi que celle des machines intel plus l'architecture "Wintel" est attractive pendant que les fabricants cherchent le plus grand marché pour leur logiciel et les clients cherchent des systèmes compatibles avec le logiciel le plus répandu : plus les ordinateurs Wintel augmentaient leurs ventes, plus la base installée est large. Ces boucles positives sont toutes des processus qui génèrent leur propre croissance ce qui conduit à des courses à l'armement, à la guerre des prix et à la croissance phénoménale de Microsoft et d'intel respectivement.

Les boucles négatives se contrecarrent et s'opposent au changement. Moins il y a de la nicotine dans la cigarette, plus les fumeurs doivent en consommer pour avoir la dose dont ils ont besoin. Plus un quartier ou une ville est attractive, plus l'immigration est grande en provenance des localités environnantes, ce qui accroît le manque d'emploi, les prix du logement, le surpeuplement des écoles, et la congestion de la circulation jusqu'à ce qu'il ne soit plus aussi attractif que les autres lieux où habitent les gens. Plus le prix d'un produit est élevé, plus la demande est faible et plus la production est importante ce qui conduit à une accumulation des stocks et une pression pour réduire les prix en vue d'éliminer le surplus de stock. Plus la part de marché des grandes sociétés est grande plus il est probable de voir une action anti-trust pour limiter le pouvoir de monopole. Toutes ces boucles décrivent des processus qui tendent à s'auto limiter, des processus qui recherchent la balance et l'équilibre.

**Réaction positive :** Les boucles positives s'auto-renforcent. Dans ce cas, un plus grand nombre de poulets pondent plus d'œufs qui couvent et augmentent la population de poulets ce qui conduit à plus de poulets et d'œufs et ainsi de suite. Un diagramme de boucles causales ou CLD (chapitre 5) reflète la dépendance de réaction des poulets et œufs. Les flèches indiquent les rapports de causalités. Les signes + au bout des flèches indiquent que l'effet est positivement lié à la cause: une augmentation de la population de poulets fait augmenter le nombre d'œufs pondus par jour au dessus du niveau régulier (et vice versa: une réduction de la population des poulets provoque la réduction de la production d'œufs au dessous du niveau normal). La boucle s'auto renforce, d'où l'identificateur de polarité R. Si cette courbe était la seule qui fonctionne, les poulets et les œufs augmenteraient de manière exponentielle.

---

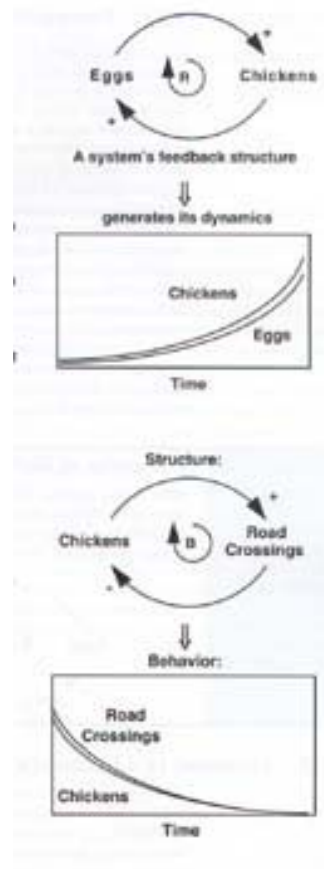
<sup>3</sup>Même les scientifiques souffrent de ces problèmes. J'ai une fois entendu un grand physicien soutenir que la solution au problème d'énergie était de construire des centaines de centrales nucléaires immenses qui se refroidissent avec l'eau de mer. L'eau usée est pompée dans l'océan où, dit-il "la chaleur de l'eau usée disparaîtrait". Loin des yeux et loin de l'esprit.

Bien sur, aucune quantité réelle ne peut augmenter éternellement. Il doit y avoir des limites à la croissance. Ces limites sont créés par des réactions négatives.

**Réaction négative** : Les boucles négatives s'auto-correctent. Elles contrecarrent le changement. Avec la croissance de la population de poulets, diverses boucles négatives équilibrent la population de poulets par rapport à la capacité de charge. Une réaction classique est montrée ici : plus il y a des poulets, plus il y a des tentatives de traversées de la route. S'il y a de la circulation routière, plus de traversées conduiront à moins de poulets (d'où la polarité négative du lien entre la traversée des routes et les poulets). L'augmentation de la population de poulets conduit à plus de traversées de routes dangereuses ce qui réduit de nouveau la population de poulets. Le **B** dans le centre de la boucle dénote d'une réaction équilibrante. Si la boucle de traversée de route était la seule qui fonctionne (par ex : si le fermier vend tous ses œufs), le nombre de poulets diminuerait progressivement jusqu'à ce qu'il y en aura plus.

Tous les systèmes quelque soit leur complexité comportent des réseaux de réactions positives et négatives et toutes les dynamiques découlent de l'interaction de ces boucles entre elles.

**Figure 1-5**



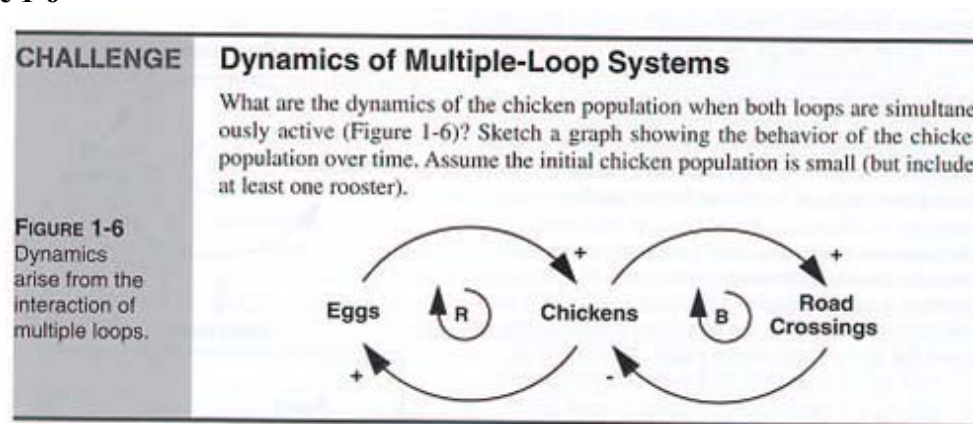
#### 1.1.4. Point de processus : Le sens de la réaction

Dans le langage courant le terme "feedback ou réaction" est un euphémisme pour la critique des autres comme "le chef m'a donné ses réactions sur ma présentation". Cette acception du terme réaction n'est pas celui qui est utilisé dans les dynamiques des systèmes. En plus, "la réaction positive" ne veut pas dire "une louange" et "la réaction négative" ne signifie pas

“critiques”. “ La réaction positive” dénote d’un processus qui s’auto renforce tandis que la réaction négative signifie un processus qui s’auto- corrige. Chacun de ces types de boucle peut être bon ou mauvais tout dépend de sa manière de fonctionner et de vos valeurs. Retenez que les réactions positives ou négatives sont des processus qui s’auto renforcent ou qui s’auto corrigent et éviter de qualifier les critiques que vous faites ou dont vous faites l’objet de “ **feedback ou de réaction**”. Dire à quelqu’un votre opinion ne constitue pas un” feedback ou réaction “ à moins qu’il n’agisse dans le sens de votre suggestion ce qui vous amène à réviser votre point de vue.

Bien qu’il n’existe que deux types de boucle de réactions, les modèles pourraient facilement contenir des milliers de boucles des deux types combinés les uns aux autres comportant de multiples retards ou délais, de caractères non linéaires et d’accumulations. Les dynamiques de tous les systèmes découlent des interactions de ces réseaux de réactions. L’intuition peut nous permettre de faire une déduction sur les dynamiques de boucles isolées telles que celles montrées dans la figure 1-5. Mais lorsque les boucles interagissent, il n’est pas facile de déterminer quel genre de dynamique en sortira. Avant de continuer, essayer le défi montré dans la figure 1-6. Lorsque l’intuition échoue, nous nous tournons généralement vers la simulation informatique pour faire des déductions sur le comportement de nos modèles.

**Figure 1-6**



## 1.2 L’ apprentissage est un processus de réaction

Tout comme la dynamique provient de la réaction, de même tout apprentissage dépend aussi de la réaction. Nous prenons des décisions qui changent le monde réel ; nous rassemblons des informations de la réaction sur le monde réel, et en utilisant les nouvelles informations nous révisons notre compréhension du monde ainsi que les décisions que nous prenons pour rapprocher notre perception de l’état du système de nos propres objectifs( Figure 1-7).

La boucle de la réaction dans la figure 1-7 apparaît sous plusieurs formes voilées à travers les sciences sociales. Georges Richardson ( 1991), dans son histoire des concepts de la réaction dans les sciences sociales, montre comment, au début des années 1940 les principaux penseurs en économie, psychologie, sociologie, anthropologie, et dans d’autres domaines ont reconnus que le concept de réaction élaboré en physique et en ingénierie s’appliquait, non seulement au servomécanisme mais aussi à la prise de décision humaine et aux milieux sociaux aussi. En 1961, Forrester, dans la Dynamique Industrielle, a affirmé que toutes les décisions( y compris l’ apprentissage ) se feront dans le contexte des boucles de la réaction. Plus tard, les pouvoirs des psychologues ( 1973, p. 351) a écrit :

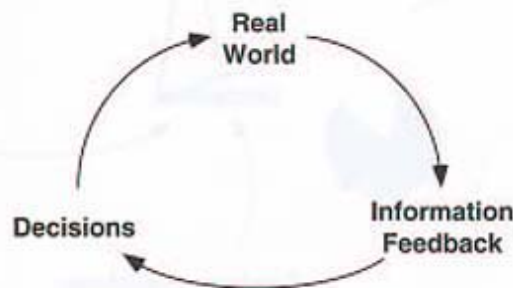
Le réaction est un aspect répandu et fondamental de comportement qui est aussi invisible comme l'air que nous respirons. Assez littéralement c'est un comportement – nous ne connaissons rien de notre propre comportement sauf les effets de la réaction de nos propres produits.

Ces penseurs de la réaction ont suivi les traces de John Dewey, qui a reconnu le caractère de réaction de la boucle de l'apprentissage vers le début du 20<sup>e</sup> siècle lorsqu' il décrivait l' apprentissage comme un cycle itératif de l' invention, d' observation, de réflexion, et d' action ( Sch On 1992). Les récits de réaction du comportement et de l'apprentissage ont maintenant touché la plus part des sciences sociales et de gestion. L' apprentissage en tant que processus explicite de la réaction est même apparu dans la gestion pratique des outils tels que la Gestion Totale de la Qualité, où le soit disant cycle de Shewhart- Deming PDCA ( Planifier- faire- vérifier- agir ) se situe au cœur du processus d' amélioration de la qualité de l' amélioration de la littérature ( Shewhart 1939 ; Shiba, Graham, et Walden 1993).

La boucle de la réaction unique montrée dans la figure 1-7 décrit le type d' apprentissage le plus fondamental. La boucle est une réaction classique et négative par laquelle les décideurs comparent les informations sur l'état du monde réel par rapport à divers objectifs, perçoivent les différences entre les états réels et voulus, et prennent des actions qu' ils (croient) mèneront le monde réel vers un état voulu. Même si les choix initiaux des décideurs ne combler pas les écarts entre les états réels et voulus, le système pourrait essentiellement atteindre les états voulus tout à mesure que les décisions ultérieures sont révisées à la lumière des informations reçues (voir Hogarth 1981). En conduisant ma voiture je peux tourner le volant de la direction un peu pour faire retourner la voiture au milieu de ma voie, mais à mesure que la réaction visuelle révèle l' erreur, je continue à tourner la direction jusqu' à ce que la voiture retrouve le droit chemin. Si le prix courant des produits de mon entreprise est très bas pour équilibrer les commandes par rapport à la production , les stocks réduits et les longs délais de livraison pourraient m' amener à augmenter progressivement le prix jusqu' à ce que je trouve un prix qui soit compétitif sur le marché.

**Figure 1-7**

**FIGURE 1-7**  
Learning is a feedback process. Feedback from the real world to the decision maker includes all forms of information, both quantitative and qualitative.

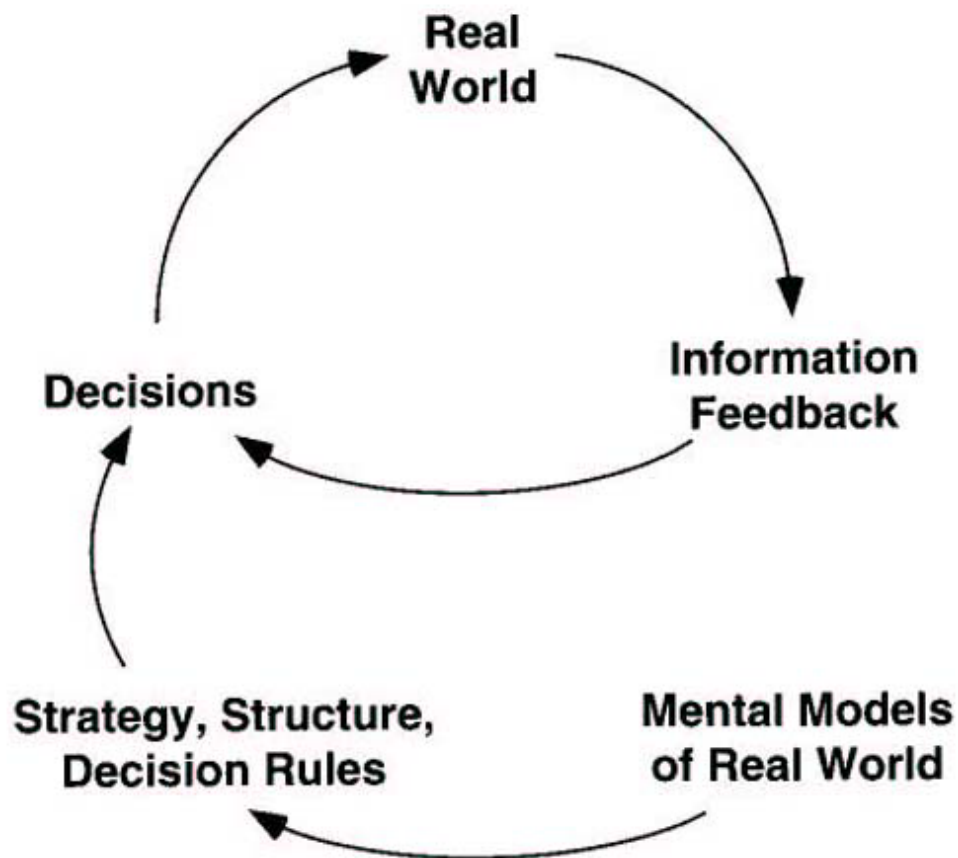


La boucle de la réaction montrée dans la figure 1-7 cache un aspect important du processus de l' apprentissage. Les informations de la réaction sur le monde réel ne sont pas les seuls apports pour nos décideurs. Les décisions sont le résultat d'application d'une règle de décision ou une politique de l'information sur le monde tel que nous le voyons (voir Forrester 1961, 1992). Les politiques sont elles-mêmes conditionnées par des structures institutionnelles, des stratégies organisationnelles, et les normes culturelles. Ceux-ci, en retour, sont régis par nos modèles mentaux (Figures 1-8). Aussi longtemps que les modèles mentaux restent sans changement, la boucle de la réaction démontrée dans la figure représente

ce que Argyris (1985) appelle une boucle unique d'apprentissage, un processus par lequel nous apprenons à atteindre nos vrais objectifs dans le contexte de nos modèles mentaux existant. L'apprentissage d'une boucle unique ne doit pas résulter en un changement profond de nos modèles mentaux- notre compréhension de la structure causale du système, la limite que nous fixons autour du système, ni des délais que nous considérons importants.

Les modèles mentaux sont largement discutés en psychologie et en philosophie. Différents théoriciens décrivent les modèles mentaux comme des collections de routines ou des procédures standards opérationnelles, des manuscrits pour la sélection d'actions possibles, des cartes cognitives du domaine, des typologies pour caractériser l'expérience, des structures logiques pour l'interprétation de la langue, ou des attributions sur les personnes que nous rencontrons dans la vie quotidienne (Axelrod 1976 ; Bower et Marrow 1990 ; Cheng et Nsbitt 1985 ; Doyle et Ford 1998 ; Genter et Stevens 1983 ; Halford 1993 ; Johnson-Laird 1983 ; Schank et Abelson 1977 ; Vennix 1990). Le concept du modèle mental a joué un rôle central dans la dynamique des systèmes depuis le début de ce domaine d'activités. Forrester (1961) souligne que toutes les décisions sont basées sur des modèles, en général des modèles mentaux. Dans la dynamique des systèmes, le terme 'modèle mental' comprend nos croyances sur les réseaux des causes et effets qui décrivent comment un système fonctionne, avec la limite du modèle (les variables qui sont inclus et ceux qui sont exclus) et la période de temps que nous considérons pertinente- notre formulation ou l'expression d 'un problème.

**Figure 1-8**

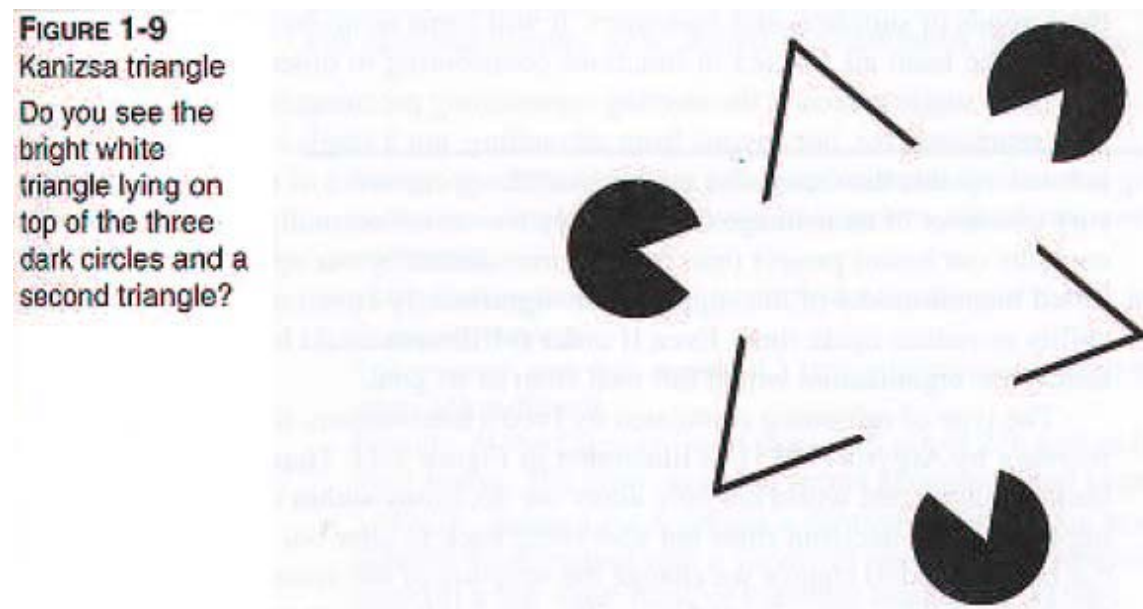


La plus part d 'entre nous n 'apprécions pas l'ubiquité et l 'invisibilité des modèles mentaux, au lieu de cela nous croyant naïvement que nos sens révèlent le monde tel qu 'il est. Au



contraire, notre monde est activement construit (modélé) par nos sens et nos cerveaux. La figure 1-9 montre une image élaborée par le psychologue Gaetano Kanizsa. La plus part des gens voient un brillant triangle blanc reposant sur le sommet de trois cercles et un second triangle avec des bordures noires. L'illusion est extrêmement puissante (essaie de regarder la figure et 'ne pas voir' les deux triangles !). La recherche montre que les structures neurales responsables de la faculté de voir des contours illusoires tel que le triangle blanc existe entre le nerf optique et les parties du cerveau responsables du traitement de l'information visuelle. La modélisation active se produit bien avant que l'information sensorielle atteigne les parties du cerveau responsables de la pensée consciente. Les pressions évolutives puissantes sont responsables : notre survie est tellement dépendante entièrement de la capacité à interpréter rapidement notre environnement que nous (et autres espèces) ont depuis longtemps élaboré des structures pour construire automatiquement ces modèles. Généralement nous ignorons totalement que ces modèles mentaux existent même. Ce n'est que lorsque une construction telle que le triangle de Kanizsa révèle l'illusion que nous nous rendons compte des modèles mentaux.

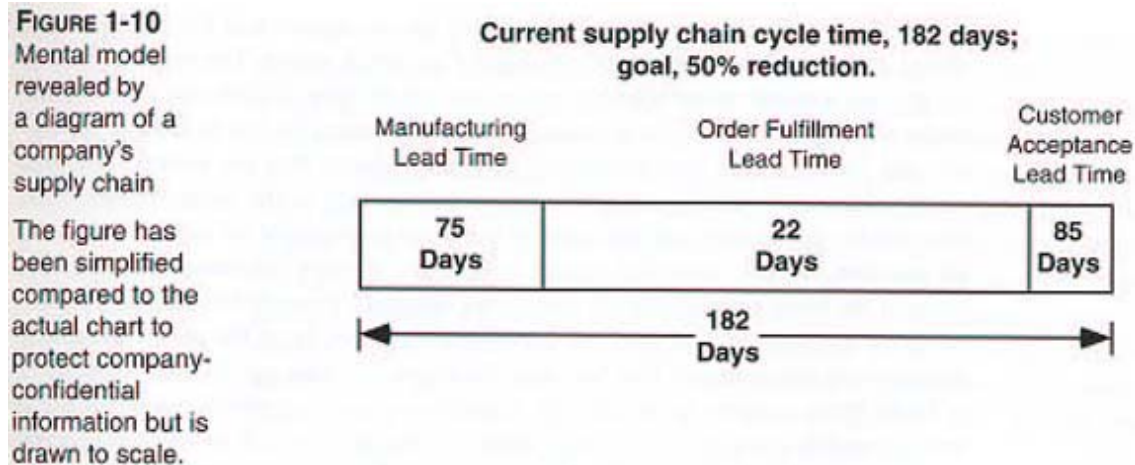
**Figure 1-9**



5 Voir science, 256, (lime 12, pp. 1520-1521).

6 De manière plus évidente, notre capacité de voir un monde à trois dimensions est le résultat d'une vaste modélisation par le traitement du système visuel, puisque la rétine envoie une projection plate du champs visuel.

**Figure 1-10**



Le triangle de Kanizsa illustre la nécessité d'une modélisation mentale active et inconsciente ou d'une construction de la 'réalité' au niveau de la perception visuelle. La Modélisation de la connaissance de haut niveau est tout aussi inévitable et souvent même tout aussi inconsciente. La figure 1-10 montre le modèle mental élucidé lors d'une rencontre entre mon collègue Fred Kofman et une équipe d'une grande société multinationale. La société travaillait avec le Centre Organisationnel d'Apprentissage à MIT au début des années 1990 pour réduire le cycle total du temps pour leur chaîne d'approvisionnement. A cette époque le cycle était de 182 jours et elles cherchaient à le réduire de moitié. La société considérait les réductions dans le temps du cycle comme étant essentielles pour une continuité de la compétitivité et même pour la survie de la société. Avec le soutien des hauts cadres, ils ont formé une équipe pour aborder ces questions. Lors de la première rencontre, l'équipe a présenté des informations sur la question y compris la figure 1-10.

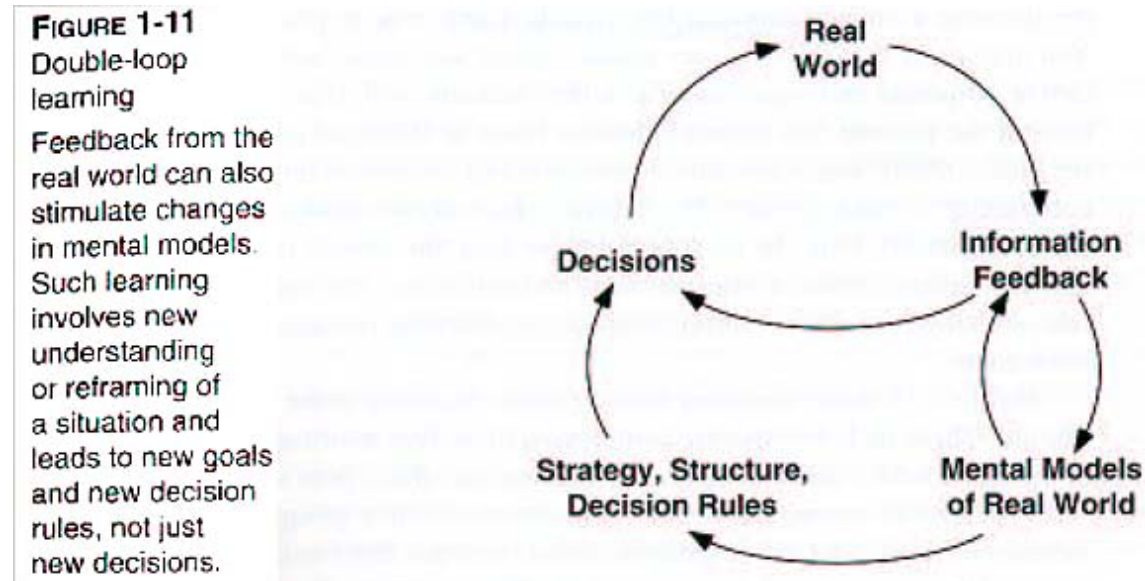
La figure montre le temps du cycle actuel divisé en trois intervalles le long d'une ligne : délai de fabrication, le délai de livraison de la commande, et délai d'acceptation du client. La livraison de la commande, qui exigeait alors les 22 jours, occupe plus de la moitié de la longueur totale de la ligne. Tandis que le délai de fabrication, qui exigeait 75 jours (70 jours dus aux fournisseurs), reçoit à peu près le quart de la longueur. L'acceptation du client, qui exigeait 85 jours, occupe seulement le un-huitième de la longueur totale. Ce que la figure révèle est l'importance des opérations d'exécution de la commande dans les modèles mentaux des membres de l'équipe et le peu d'importance accordé dans leurs esprits aux fournisseurs et clients. Il ne sera pas surprenant de savoir que les membres de l'équipe aient tous travaillé dans des fonctions qui contribuent à l'exécution des commandes. Il n'y avait pas une seule personne à la réunion représentant l'approvisionnement, ni un seul représentant les fournisseurs, ni personne de la comptabilité, ni un seul client. Jusqu'au moment où Fred a montré cette anomalie, les membres du groupe ignoraient aussi le caractère illusoire de leur image de la ligne d'approvisionnement ainsi que celui des contours illusoires que nos cerveaux projettent dans les données transmises par nos nerfs optiques. Le modèle mental déformé de la chaîne d'approvisionnement a sensiblement limité la capacité de la société à réduire le temps du cycle : même si l'exécution de la commande pouvait être immédiatement réalisée l'organisation sera loin de l'atteinte de son objectif.

Le type de re-formulation stimulé par l'intervention de Fred, dénotait une double boucle d'apprentissage par Argyris (1985), et est illustré dans la figure 1-11. Ici, l'information de la



réaction sur le monde réel ne change pas seulement nos décisions dans le contexte des cadres existants et les règles de décision mais aussi exerce une influence pour changer nos modèles mentaux. A mesure que nos modèles mentaux changent nous changeons aussi la structure de nos systèmes, créant ainsi, différentes règles de décision et de nouvelles stratégies. La même information, traitée et interprétée par une différente règle de décision, produit maintenant une décision différente. En changeant la structure de nos systèmes nous changeons ensuite leurs modes de comportements. L'élaboration des systèmes de pensée est un processus d'apprentissage à double boucle dans lequel nous remplaçons une vue réductrice, statique étroite du monde par une vue holistique, large, dynamique à long terme, et nous concevons à nouveau nos politiques et institutions en conséquence.

**Figure 1-11**



### 1.3 Barrières A L'Apprentissage

Pour que l'apprentissage ait eu lieu, chaque lien dans les deux boucles de la réaction montrée dans la figure 1-11 doit efficacement fonctionner et nous devons être capable de parcourir rapidement les boucles par rapport au rythme auquel les changements se produisant dans le monde réel rendent la connaissance existante désuète. Pourtant dans le monde réel, plus particulièrement dans le monde de l'action sociale, ces réactions ne fonctionnent pas bien souvent. Plus de deux siècles et demi se sont écoulés après les premières expériences montrant que les jus de citrons pouvaient empêcher et guérir le scorbut jusqu'au moment où le citron a été mandaté par la marine marchande Britannique (tableau 1-2). L'apprentissage dans ce cas était extrêmement lent, malgré l'énorme importance du problème et les preuves décisives fournies par les expériences contrôlées pendant des années. Vous pourrez répondre aujourd'hui que nous sommes plus intelligents et apprenons plus vite. Soit. Pourtant le rythme d'échec des entreprises et des organisations reste élevé (par exemple, plus d'un tiers de la fortune de plus de 500 grandes entreprises industrielles du journal Fortune en 1970 avaient disparu avant 1983 [de Geus 1997]). Aujourd'hui le rythme du changement dans nos systèmes est beaucoup plus rapide, et leur complexité plus grande. Les retards dans l'apprentissage sur beaucoup de problèmes urgents restent extrêmement longs. Nous manquons de capacités dans beaucoup de nos milieux pour faire des expériences, et les retards entre les interventions et les résultats sont plus longs. A mesure que le rythme de changement augmente dans la société, l'apprentissage reste lent, inégal, et insuffisant.

## Tableau 1-2

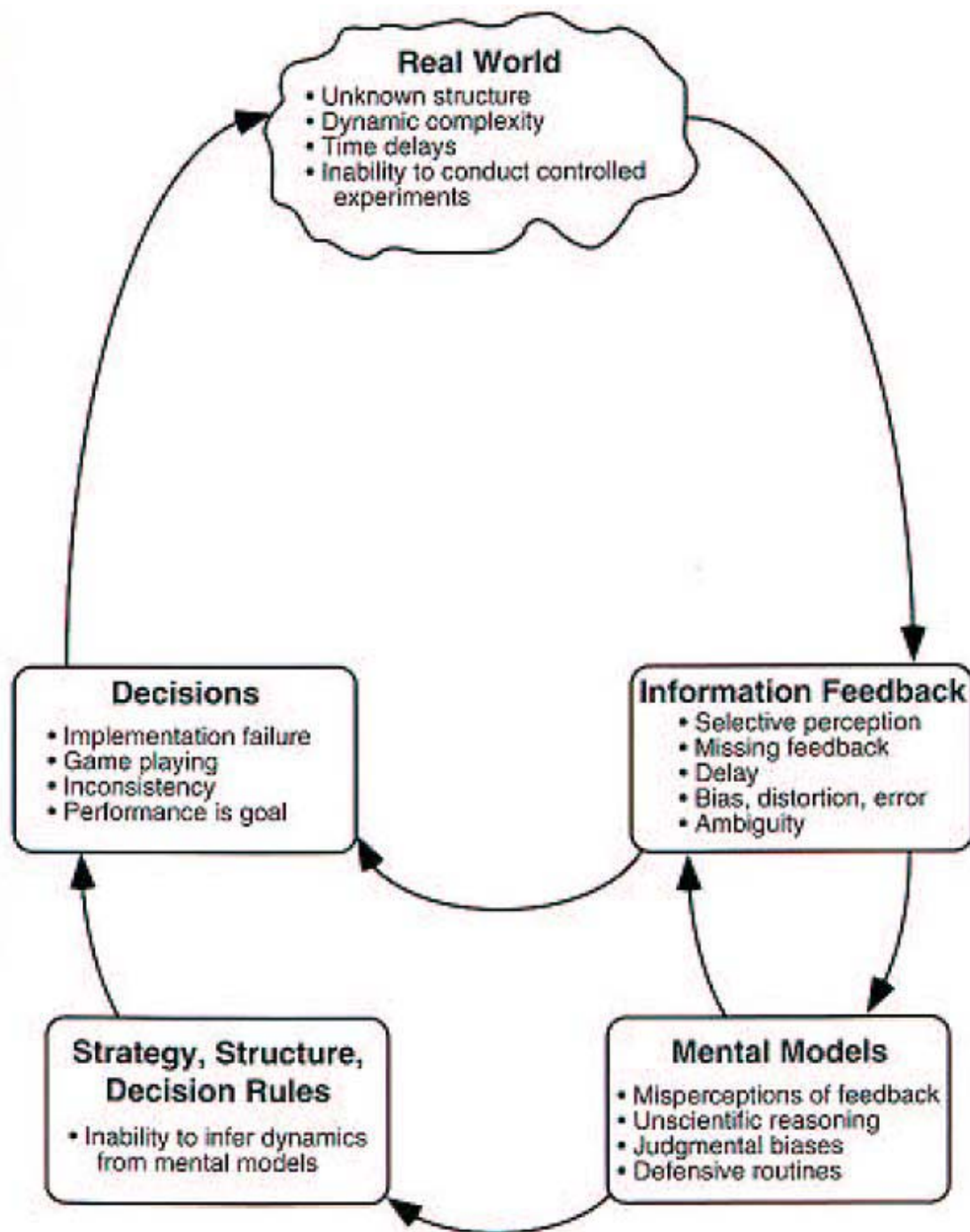
L'enseignement de nouveaux trucs aux chiens atteints de scorbut accuse un retard Total de l'apprentissage : 264 années.

\*Avant les années 1600, le scorbut ( la carence en vitamine C) tuait le plus grand nombre de marins – plus que dans les champs de bataille, les orages, les accidents, et autres incidents confondus .

- En 1601 : Lancaster a fait une expérience contrôlée lors d 'un voyage de la compagnie des Indes Orientales :
- L' équipage dans un des navires a reçu 3 cuillerées de jus de citrons par jour ; l' équipage dans trois autres navires n'en prenait pas.
- Les résultats : Au cap de bonne espérance 110 sur 278 des marins ont péri, la plus part de scorbut .L'équipe qui recevait du jus de citron restait en pleine forme.
- En 1747 : Dr James Lind a fait une expérience contrôlée à travers laquelle les patients qui étaient atteints du scorbut étaient traités avec une variété d'élixirs. Ceux qui recevaient des citrons étaient guéris en quelque jours ; aucun des autres traitements ne marchait.
- En 1795 : La Marine Royale Britannique a commencé l'utilisation des citrons sur une base régulière. Le scorbut a été éradiqué.
- En 1865 : Le Ministère Britannique du Commerce autorise l'utilisation des citrons. Le scorbut fut éradiqué dans la marine marchande.

La figure 1-2 montre les principales manières dans lesquelles chaque lien dans les réactions de l 'apprentissage peut échouer. Celles-ci comprennent la complexité de la dynamique, les mauvaises informations sur l' état du monde réel , des variables confuses et ambiguës, des faibles raisonnements scientifiques, des routines défensives, et d' autres futilités aux processus effectifs du groupe, les échecs de mise en œuvre, et les mauvaises perceptions de la réaction qui gêne notre capacité à comprendre la structure et la dynamiques des systèmes complexes.

Figure 1-12



### 1.3.1. Complexité de la dynamique

Une grande partie de la littérature en psychologie, économie, et autres domaines indiquent que l'apprentissage se déroule par des simples boucles de réactions négatives, décrits dans la figure 1-11. Implicitement, les boucles sont perçues comme des réactions rapides, linéaires, négatives qui produisent une convergence stable conduisant à un résultat équilibré ou optimal, tout comme la réaction visuelle immédiate vous permet de remplir un verre d'eau sans verser son contenu. Le monde réel n'est pas si simple. Dès le début, la dynamique des systèmes mettait l'accent sur le caractère multi- boucles, multi- états et non linéaire des

systèmes de réaction dans lesquels nous vivons( Forrester 1961).Les décisions de n'importe quel agent produisent une des nombreuses réactions des boucles qui fonctionnent dans n'importe quel système donné. Ces boucles réagissent face aux actions des décideurs de manières à la fois attendue et inattendue; il peut y avoir des boucles de réactions positives aussi bien que négatives, et ces boucles comporteront beaucoup de stocks( variables d'états) et beaucoup de non- linéarités. Les systèmes naturels et humains comportent un niveau élevé de complexité dynamique. Le Tableau 1-3 montre quelques caractéristiques des systèmes qui donnent naissance à la dynamique de la complexité.

Beaucoup de gens pensent à la complexité en termes de nombre de composantes dans un système où du nombre de combinaisons que l'on doit prendre en compte en prenant une décision. Le problème de programmation d'une façon optimale des vols aériens et les équipages sont extrêmement complexes, mais la complexité s'élargit afin de trouver la meilleure solution en dehors d'un nombre astronomique de possibilités. Ces problèmes comparables à la recherche d'une aiguille dans une botte de foin connaissent un niveau élevé de complexité de combinaison ( aussi connu comme une complexité de détails).

La dynamique de la complexité, en revanche, peut se produire dans des systèmes simples d'une faible complexité combinatoire. La distribution des jeux de Beer ( Sterman 1989b chap. 17.4) donne un exemple : le comportement complexe et insuffisant proviennent d'un système très simple dont on peut expliquer les règles en 15 minutes. La dynamique de la complexité découle de l'interaction parmi les agents au fil du temps.

Les délais se situant entre le moment de la prise de décision et ses effets sur l'état du système sont fréquents et particulièrement troublants. Evidemment, les retards ou délais réduisent le nombre de fois temps qu'on peut parcourir la boucle d'apprentissage, ralentissant la capacité d'accumuler de l'expérience, de tester les hypothèses, et de s'améliorer. Schneiderman ( 1988) a évalué la moitié de vie d'amélioration – le temps requis pour réduire la déficience de moitié – dans une large gamme de sociétés de fabrication. Il a trouvé que la moitié de vie d'amélioration qui est aussi courte que quelques mois pour les processus connaissant des petits retards/délais, par exemple à travers la réduction d'erreurs des opérateurs dans un bureau de placement, tandis que les processus complexes avec des délais/retards de temps prolongés tels que le développement de produit une moitié de vies d'amélioration de plusieurs années ou de plus de 7.

La dynamique de complexité ne ralentit pas seulement la boucle d'apprentissage ; elle réduit aussi l'apprentissage reçu dans chaque cycle .Dans beaucoup de cas les expériences contrôlées sont extrêmement coûteuses ou contraires à l'éthique. Plus souvent, il est simplement impossible de faire des expériences contrôlées. Les systèmes complexes sont en déséquilibre et évoluent. Beaucoup d'actions donnent des conséquences irréversibles .Le passé ne peut bien se comparer à la circonstance actuelle. L'existence de multiples réactions interagissant montre qu'il est difficile de maintenir d'autres aspects du système constants pour isoler l'effet de la variable d'intérêt. Beaucoup de variables changent simultanément, semant la confusion dans l'interprétation de comportement du système et réduisant l'efficacité de chaque cycle autour de la boucle d'apprentissage.

---

7 Sterman Repenning, et Kofman ( 1997) montre comment les taux différentiels de l'amélioration ont mené à la difficulté au principal fabricant du semi-conducteur.

### **Tableau 1-3**

La complexité dynamique se produit parce que les systèmes sont :

- Dynamiques : Heraclitus a dit ‘ ‘ Tout change ‘Ce qui paraît inchangé est, au bout d’une longue période de temps, perçue comme variable. Le changement dans les systèmes se passent au cours plusieurs échelles de temps et ces différentes échelles interagissent parfois. Une étoile évolue sur plus d ‘un milliard d’années pendant qu’elle brûle son combustible d’hydrogène, puis elle peut alors exploser comme un supernova au bout de quelques secondes. Les marchés de spéculation peuvent continuer pendant des années, et font ensuite faillite au bout de quelques heures.
- Fortement couplés : Les acteurs dans le système interagissent vigoureusement les uns aux autres avec le monde réel. Tous les éléments sont liés les uns aux autres . Comme le proclamé un autocollant d’un parechocs des années 1960. ‘Vous ne pouvez pas faire qu’une seule chose ‘
- régi par la réaction: A cause des couplages serrés parmi les acteurs, nos actions réagissent sur elles-mêmes. Nos décisions changent l’état du monde, provoquant des changements dans la nature et poussant d ‘autres à agir, en donnant lieu ainsi à une nouvelle situation qui influence alors nos prochaines décisions. Les dynamiques proviennent de ces réactions.
- Non linéaire: l’effet est rarement proportionnel à la cause, et ce qui se passe localement dans un système (près du point d ‘exploitation actuel) ne s ‘applique pas souvent dans les régions lointaines (autres états du système). La non linéarité provient souvent de la base physique des systèmes : Un stock insuffisant pourrait vous pousser à accroître la production, mais la production ne peut jamais descendre au dessous de zéro quelque soit le surplus de stocks dont vous disposez . La non linéarité peut également se produire lorsque de multiples facteurs interagissent au cours de la prise de décision : la pression de la part du chef pour un plus grand rendement accroît votre motivation et effort – jusqu ‘à ce que vous réalisez qu ‘il est impossible d’atteindre votre objectif. La frustration domine alors votre motivation et vous abandonnez ou trouvez un nouveau patron.
- Dépend de l’Histoire: suivre un chemin exclut d’autres chemins et détermine où vous arriverez (c’est la dépendance vis à vis du chemin). Beaucoup d’actions sont irréversibles : Vous ne pouvez pas décodifier un œuf (la seconde règle de la thermodynamique). Les stock et les flux (accumulations) et les retards/délais prolongés impliquent souvent que le fait de faire ou de défaire connaissent des constantes de temps fondamentalement différentes : Pendant les 50 ans de la course aux armements durant la guerre froide les nations possédant l’arme nucléaire ont produit plus de 250 tonnes de plutonium pouvant servir à la fabrication d’armes( $^{223}\text{Pu}$ ) la moitié de la vie de  $^{239}\text{Pu}$  est d ‘environ 24,000 années.
- Auto- organisationnelle : La dynamique des systèmes provient spontanément de leur structure interne. Souvent, des petites perturbations aléatoires sont amplifiées et moulées par la structure de la réaction, créant des modèles dans le temps et dans l ‘espace et créant un chemin de dépendance. Le motif des rayures sur un zèbre, la contraction rythmique de votre cœur, les cycles persistants dans le marché de l ‘immobilier, et des structures telles que les coquillages et les marchés, tous

proviennent spontanément des réactions parmi les agents et les éléments du système.

- Adaptatif : Les capacités et les règles de décision des agents dans des systèmes complexes changent au fil du temps. L'évolution mène à la sélection et à la prolifération de certains agents tandis que d'autres disparaissent. L'adaptation se produit également lorsque les gens apprennent à partir des expériences, surtout lorsqu'ils apprennent des nouvelles manières d'atteindre leurs objectifs face aux obstacles. L'apprentissage n'est pas toujours bénéfique, cependant.
- Contre-intuitif : Dans les systèmes complexes les causes et effets sont distants dans le temps et dans l'espace lorsque nous avons tendance à rechercher les causes à côté des événements que nous cherchons à expliquer. Notre attention est attirée vers les symptômes de la difficulté plutôt que vers sa cause profonde. Les politiques à fort effet de levier ne sont pas souvent évidentes.
- Résistante aux politiques : La complexité des systèmes dans laquelle nous nous trouvons fortement impliqués dépasse notre capacité à les comprendre. Résultat : beaucoup des solutions apparemment évidentes n'aboutissent pas et aggravent même la situation.
- Caractérisé par des compromis : Les retards/délais dans les chaînes de réaction signifient qu'une réponse de longue durée d'un système à une intervention est souvent différente de sa réponse de courte durée. Les politiques à fort effet de levier causent souvent des comportements mauvais avant d'être mieux, tandis que les politiques à faible effet de levier, engendrent souvent une amélioration transitoire avant que le problème ne s'empire davantage.

Les retards ou délais créent aussi des déséquilibres dans la dynamique des systèmes. L'ajout des retards aux boucles négatives de réaction accroît la tendance pour le système d'oscillation de conduite d'une voiture, de boisson d'alcool, d'élevage de porcs, de construction des bureaux, tous ceux-ci impliquent des retards entre l'initiation d'un contrôle d'action (accélération/freinage, décider d'Avoir un autre ' 'choisir d'élever beaucoup plus de porcs, construction d'un nouveau bâtiment) et ses effets sur l'état du système. Par conséquent, les décideurs continuent souvent à intervenir pour corriger les différents décalages apparents entre l'état désiré et actuel du système même après que des actions correctives aient été apportées pour restituer l'équilibre du système. Le résultat est un dépassement et l'oscillation : circulation routière lente, l'ivrognerie, les cycles des produits, et les cycles de la croissance et de la faillite (voir chapitre 17.4). L'oscillation et l'instabilité réduisent notre capacité de contrôle à confondre les variables et à discerner les causes et effets, ralentissant davantage le rythme d'apprentissage.

### **1.3.2 Informations Limitées**

Nous connaissons le monde réel à travers des filtres. Personne ne connaît le taux courant des ventes de leur société, ou la vraie valeur des commandes en instance à n'importe quel moment précis. Au lieu de cela, nous recevons des estimations de ces données sur la base des mesures d'échantillonnage, de moyennes et de retards. L'acte de mesure introduit des déformations, des retards, des partialités et autres imperfections dont certaines sont connues et d'autres inconnues et non connaissables.

La mesure est surtout un acte de sélection. Nos sens et systèmes d'informations ne sélectionnent qu'une petite fraction d'expérience possible. Certaines de ces sélections sont câblées ( nous ne pouvons pas voir à travers un infrarouge ou entendre par un ultrason). Certaines résultent de nos propres décisions. Nous définissons les produits intérieurs bruts( PIB) de sorte que l'extraction des ressources non renouvelables soient considérée comme une production plutôt que comme un épuisement des stocks de capitaux naturels afin que les soins médicaux et les frais funéraires causés par les maladies dues à la pollution s'ajoutent au PIB tandis que la génération de la pollution elle-même ne le réduit pas. Comme les prix de la plupart de nos biens dans notre système économique n'incluent pas les coûts de la réduction des ressources ou de la dégradation environnementale, ces externalités n'ont que peu de poids dans la prise de décisions ( voir Cobb et Daly 1989 pour une discussion réfléchie de mesures alternatives du bien être économique ).

---

8 Techniquement, des boucles négatives qui ne présentent pas de retards sont de premier ordre : la valeur eigen du système linéaire peut être vraie et l'oscillation est impossible. L'ajout des retards ( l'état des variables ) permet à la valeur eigen d'être complexe à conjuguer, donnant des solutions oscillatoires. Que les oscillations du système linéaire soient freinées ou élargies dépend des paramètres. Tout compte fait, le retard de la phase est longue dans une boucle de contrôle, moins le système sera stable.

Bien sûr, les systèmes d'informations régissant la réaction que nous recevons peuvent changer au moment où nous apprenons. Ils font partie de la structure de réaction de nos systèmes. A travers nos modèles mentaux nous définissons des concepts tels que le PIB ou la recherche scientifique, créons des mesures métriques pour ces idées, et mettons au point des systèmes d'informations pour les évaluer et les rapporter. Ensuite, ceux-ci conditionnent nos perceptions que nous formons. Les changements dans nos modèles mentaux sont limités parce que nous avons précédemment choisi pour définir, mesurer, et suivre. Voir c'est croire et croire c'est voir. Ils agissent les uns sur les autres.

Dans une célèbre expérience, Bruner et Postman (1949) ont montré aux gens des cartes de jeux utilisant un tachistoscope pour contrôler le temps d'exposition aux stimulants. La plupart pouvait rapidement et correctement identifier les cartes. Ils y ont aussi inséré des cartes anormales, tel qu'un trois de cœur de couleur noire ou un dix pique rouge. En moyenne, les gens ont passé quatre fois plus de temps pour déceler les cartes anormales. Beaucoup les ont mal identifiées (e.g. ils disaient trois de pique ou trois de cœur quand on leur montrait un trois de cœur noir). Certains n'ont pu du tout identifier la carte, même avec un temps prolongé d'exposition, ils sont même devenus anxieux et confus. Seule une petite minorité ont pu bien identifier les cartes. Bruner et Postman ont conclu que " l'organisation perceptuelle est fortement déterminée par les attentes fondées sur le commerce avec l'environnement " Henri Bergson l'a affirmé plus succinctement : " l'œil voit seulement ce que le cerveau est préparé à comprendre".

La réaction d'auto-renforcement entre les attentes et les perceptions a été démontrée dans une grande variété d'études expérimentales ( voir Pious 1993 pour une discussion excellente ). Parfois la réaction positive aide l'apprentissage en aiguisant notre capacité à percevoir les caractéristiques de l'environnement, comme lorsque un naturaliste expérimenté identifie un oiseau dans une forêt distante là où le petit chasseur d'oiseau novice voit seulement un feuillage emmêlé. Cependant, souvent, la réaction mutuelle des attentes et perceptions limitent l'apprentissage en nous cachant les anomalies qui pourraient défier nos modèles mentaux. Thomas Kuhn ( 1970 ) a cité l'étude de Bruner- Postman pour affirmer qu' " un scientifique paradigme dissimule la perception des données non cohérentes avec le paradigme, rendant difficile pour les scientifiques de percevoir les anomalies qui pourraient les conduire à la révolution scientifique. 9

Comme un des nombreux exemples, l'histoire de la réduction de la couche d'ozone par les chlorofluorocarbones (CFC) montre bien que la dépendance mutuelle de l'attente et de la perception n'est pas un objet d'art de laboratoire mais un phénomène dont les conséquences sont potentiellement graves pour l'humanité.

Les premières communications scientifiques décrivant la capacité des CFC à détruire la couche d'ozone atmosphérique ont été publiées en 1974.

(Molina et Rowland 1974 ; Stolarski et Cicerone 1974). Malgré tout, la plus part de la communauté scientifique est restée sceptique, et malgré une interdiction des CFC comme produit aérosol de propulsion, la production mondiale des CFC est restée proche de son niveau le plus élevé. Ce n'est qu'en 1985 que des preuves de l'existence d'un trou profond d'ozone dans l'antarctique ont été publiées (Farman, le Gardiner, et Shanklin 1985). Comme décrit par Meadows, Meadows et Randers( 1992, pp. 151-152) :

La nouvelle s'est répandue partout dans le monde scientifique. Les scientifiques à la [NASA]...se bouscullaient pour vérifier les relevés sur la couche d'ozone atmosphérique affichés par le satellite Nimbus 7, portant sur les mesures qui ont été systématiquement prises depuis 1978. Le Nimbus 7 n'avait jamais indiqué un trou d'ozone. En vérifiant les relevés des périodes passées, les scientifiques de la NASA ont trouvé que leurs ordinateurs avaient été programmés pour rejeter les relevés à très faibles chiffres de l'ozone en supposant que les relevés à faibles chiffres indiqueraient une panne ou un dysfonctionnement des appareils.

La position des scientifiques de la NASA selon laquelle les faibles relevés de la couche d'ozone pourraient être erronés les ont conduit à mettre au point un système de mesure qui rendrait impossible la détection de faibles relevés qui auraient pu démontrer que leur position était inexacte. Heureusement, la NASA avait gardé l'original composé de données qui n'ont pas été filtrées et a plus tard confirmé que les concentrations de l'ozone avaient été en déclin depuis le lancement de Nimbus 7. Comme la NASA a créé un système de mesures protégé contre la non confirmation la découverte du trou de l'ozone et les accords mondiaux y découlant pour mettre fin à la production du CFC a été retardée de 7 ans. Ces 7 ans pourraient être significatifs: les niveaux des couches d'ozone dans l'Antarctique ont baissés au moins d'un tiers par rapport à la normale en 1993 et les modèles actuels montrent que même en respectant l'interdiction (il y a un marché noir florissant des CFC), le chlore atmosphérique ne va pas commencer à chuter jusqu'à la première décennie du 21 siècle et même très lentement ensuite. Les données collectées près de Toronto au début des années 1990 ont montré une augmentation de 5 % de la radiation ultraviolette UV B causant le cancer au niveau terrestre, indiquant que la réduction de la couche d'ozone affecte déjà fortement les zones très peuplées agricoles de l'hémisphère nord (Culotta et Koshland 1993). L'allègement de la couche d'ozone est un phénomène mondial, pas seulement un problème pour les pingouins.

---

9 Sterman 9 1985a ) a élaboré un ancien modèle de la théorie de Kuhn, qui a démontré que la réaction positive entre les attentes et les perceptions supprimaient la reconnaissance des anomalies et l'apparition de nouveaux paradigmes. Sterman et Wittenberg ( 1999) ont élargi le modèle pour simuler la compétition entre les théories rivales.

### **1.3.3. Confusion des variables et de l'ambiguïté**

Pour apprendre nous devons utiliser les informations limitées et imparfaites qui nous sont disponibles pour comprendre les effets de nos propres décisions, ainsi nous pouvons ajuster



nos propres décisions pour conformer l'état du système à nos objectifs (apprentissage à boucle unique) et ainsi nous pouvons réviser nos modèles mentaux et concevoir à nouveau le système lui-même (apprentissage à double-boucles). Pourtant une grande partie des informations que nous recevons sont ambiguës. L'ambiguïté apparaît, car les changements dans l'état du système provenant de nos propres décisions sont confondus avec les changements simultanés dans beaucoup d'autres variables. Le nombre de variables qui pourraient affecter le système dépasse de loin les données disponibles servant à exclure les théories alternatives et les interprétations concurrentes. Le problème d'identification affecte à la fois les approches qualitatives et quantitatives. Dans le domaine qualitatif, l'ambiguïté provient de la capacité de la langue à comprendre de multiples sens. Au début du monologue de Richard III, le bossu Richard se lamente de sa déformation :

Et cependant, puisque je ne peux être amoureux  
 Pour bien passer ces jours bien dits et d' adieu,  
 Je suis déterminé à être un scélérat  
 Et de haïr les plaisirs oisifs de ces jours ci. ( I, i, 28-31)

Est-ce que Richard célèbre son libre choix d' être le mal ou de se résigner à un sort prédestiné? Est- ce que Shakespeare voulait exprimer les deux sens ? des textes riches, ambiguës de multiples nuances de sens montre souvent la beauté et l'art profond , ainsi que l' 'emploi pour les critiques littéraires, mais le rend aussi difficile pour comprendre les pensées des autres, exclure les hypothèses concurrentes, et évaluer l'impact de nos actions passées afin que nous puissions nous décider de la manière d'agir dans l'avenir.

Dans le domaine quantitatif, les ingénieurs et les économètres ont débattu de ce problème, de l'identification et de la structure originales et des paramètres d'un système à partir de son comportement observé. Une théorie élégante et sophistiquée existe pour délimiter les conditions dans lesquelles on peut identifier un système à partir de son seul comportement. En pratique les données sont très rares et les spécifications alternatives plausibles sont trop nombreuses pour que les méthodes statistiques fassent une discrimination entre les théories en compétition. Souvent les mêmes données soutiennent des modèles très divergents tout aussi bien , et les conclusions basées sur de tels modèles ne sont pas solides. Comme Learner ( 1983) le dit dans un article intitulé'' enlevons le con en de l'économétrie''

Afin de tirer des déductions des données comme décrites par les textes économétriques, il est nécessaires de faire des hypothèses capricieuses ...La façon aléatoire dont nous étudions individuellement et collectivement la fragilité des déductions laissent la plupart d' 'entre nous peu non convaincus que toute déduction est crédible'

### **1.3.4 Rationalité Limitée et les Mauvaises Perceptions de la Réaction**

La complexité dynamique et les informations limitées réduisent le potentiel de l' 'apprentissage et la performance en limitant notre connaissance du monde réel .Mais comment utilisons nous avec sagesse la connaissance que nous avons ? Est ce que nous traitons les informations que nous obtenons de la meilleure manière pour prendre les meilleures décisions possibles? Malheureusement la réponse est non.

Les humains ne sont pas seulement des êtres rationnels, pesant calmement les possibilités et jugeant les probabilités. Les émotions, les réflexes, les motivations inconscientes, et d' 'autres facteurs non rationnels et irrationnels jouent tous un grand rôle dans nos jugements et comportements. Mais même quand nous prenons le temps de réfléchir et de délibérer, nous ne pouvons pas pleinement nous conduire d' 'une façon rationnelle (c' 'est à dire, prendre les

meilleures décisions possibles et donner les informations qui nous sont disponibles). Aussi merveilleux qu'est le cerveau humain, la complexité du monde réel dépasse de loin nos capacités cognitives. Herber Simon a exprimé clairement les limites sur la capacité de prise de décision de l'être humain dans son célèbre 'Principe de rationalité limitée' pour lequel il a gagné un prix Nobel Mémoire en économie en 1979 :

La capacité du cerveau humain à formuler et à résoudre les problèmes complexes est très petite comparée à la taille du problème dont la solution est requise pour un comportement objectif et rationnel dans le monde réel ou même pour se faire une approximation raisonnable d'une rationalité objective. (Simon 1957, p. 198) :

Je ne dis pas qu'on doive abandonner l'économétrie, malgré ces difficultés. Au contraire, une utilisation sage des données numériques et des estimations statistiques est importante pour une bonne pratique de la dynamique des systèmes, et on doit consacrer beaucoup plus d'efforts pour l'utilisation de ces outils dans l'élaboration du modèle de simulation et de teste. Voir chap. 21.

Face à une complexité débordante du monde réel, la pression du temps, les capacités cognitives limitées, nous sommes obligés de recourir aux procédures d'apprentissage par cœur, d'habitudes, de règles, et de simples modèles mentaux pour la prise de décisions. Bien que nous nous efforçons parfois de prendre les meilleures décisions que nous pouvons, la rationalité limitée implique que nous ne parvenons pas souvent à nos fins de manière systématique ce qui limite notre capacité à apprendre de notre expérience.

Bien que la rationalité limitée affecte tous les contextes de la décision, elle est particulièrement aiguë dans la dynamique des systèmes. En effet, des études expérimentales ont montré que les gens ont de mauvais résultats dans les systèmes, même avec les modestes niveaux de complexité de la dynamique (tableau 1-4). Ces études m'ont amené à suggérer que le dysfonctionnement observé dans les milieux dynamiquement complexes, proviennent des manques de perceptions de la réaction. Les modèles mentaux que les gens utilisent pour prendre leurs décisions sont dynamiquement déficients. Comme présenté ci-dessus, les gens adoptent généralement une vue à boucle ouverte de causalité basée sur les événements, ignorant les processus de réaction, et n'arrivent pas à apprécier les délais /retards entre l'action et la réponse et dans le rapportage de l'information, ils ne comprennent pas les stocks et les flux et sont insensibles aux non linéarités qui pourront modifier les forces des différentes boucles de la réaction, au fil de l'évolution du système.

Les expériences qui ont suivi montrent que plus la complexité de la dynamique est importante moins les gens réussissent par rapport au potentiel. Mieux, les expériences montrent les mauvaises perceptions de la réaction qui sont difficiles à expérimenter, malgré les motivations financières, les expériences, et la présence des institutions du marché (voir, e.g., Diehl et Sterman 1993 ; Paich et Sterman 1993 ; Kampman et Sterman 1998).

La solidité des mauvaises perceptions de la réaction et la faible performance qu'ils causent sont dues aux deux déficiences fondamentales et relatives dans notre modèle mental. Premièrement, nos cartes cognitives de la structure causale des systèmes sont extrêmement simplifiées comparées à la complexité des systèmes eux-mêmes. Deuxièmement, nous sommes incapables de faire des déductions correctes à propos des dynamiques de tous les aspects sauf pour les cartes mentales les plus simples. Les deux sont des conséquences directes de la rationalité limitée, c'est à dire, les diverses limitations de l'attention, de la mémoire, du rappel, de la capacité de traitement de l'information, et le temps qui limite la prise de décision humaine.

**Tableau 1 – 4 :**

- Dans un système simple de production – distribution (le jeu de Distribution de bière), les gens, allant des étudiants de l'Enseignement Secondaire aux PDG, provoquent des fluctuations coûteuses (cycles d'affaires). Les coûts moyens étaient de dix (10) fois plus élevés que le niveau optimal (Sternman 1989b).
- Les sujets responsables de l'investissement de capitaux dans un modèle multiplicateur-accélérateur simple de l'économie génèrent des cycles d'amplitude grands quand bien même la demande du consommateur est constante. Les coûts moyens étaient plus de 30 fois plus élevés que le niveau optimal (Sternman 1989 a).
- Les sujets qui dirigent une firme dans un marché de produit du consommateur simulé provoquent la grande production et la faillite, la guerre des prix et les caractéristiques de dégraissage allant des industries de jeux vidéo aux scies (Paich et Sternman 1993).
- Les participants opérant dans le domaine des marchés expérimentaux d'actifs soumettent de façon répétée des offres de prix bien au-delà des valeurs fondamentales, pour les voir chuter lorsqu'on ne peut plus trouver un « **grand idiot** » pour les acheter. Ces affaires spéculatives ne disparaissent pas lorsque les participants sont des professionnels de l'investissement, lorsque les incitations monétaires sont offertes, ou bien lorsque la vente à découvert est autorisée (Smith, Suchanek, et Williams 1988).
- Dans une simulation de feu de brousse, plusieurs personnes laissent leurs quartiers généraux brûler malgré leur effort considérable à éteindre le feu (Brehmer 1989).
- Dans un contexte médical les sujets jouant le rôle de docteurs commandent plus de tests tandis que les patients simulés souffrent et meurent. (Kleinmütz et Thomas 1987).

### **1.3.5 Cartes cognitives défectueuses**

Les attributions causales constituent une caractéristique centrale des modèles mentaux. Nous créons tous et actualisons les cartes cognitives des connexions causales parmi les entités et les acteurs, du banal – si je touche une flamme je me brûlerai les doigts – au plus grand – plus le déficit gouvernemental est important, plus les taux d'intérêt seront élevés. Les études relatives aux cartes cognitives montrent que peu d'entre eux incorporent les boucles de réaction. Axelrod (1976) n'a pratiquement trouvé aucun processus de réaction dans les études de cartes cognitives des leaders politiques ; les gens ont plutôt tendance à formuler des arbres de décision intuitives mettant en rapport des actions possibles avec des conséquences probables – une représentation se situant niveau des événements. Hall (1976) rapporte des cartes mentales à boucles ouvertes similaires dans une étude de l'industrie de l'édition. DOrner (1980, 1996) a révélé que les gens ont tendance à réfléchir dans des séries causales d'enchaînement unique et rencontraient des difficultés dans les systèmes comportant des effets secondaires et des voies causales multiples (encore moins de boucles de réaction). De même, les expériences dans le domaine de l'attribution causale montrent que les gens ont tendance à croire que chaque effet a une cause unique et abandonnent souvent leur recherche d'explication lorsque la première cause suffisante est trouvée (voire la discussion dans Plous 1993).

Les heuristiques que nous utilisons pour juger les relations causales conduisent systématiquement aux cartes cognitives qui ignorent les réactions, les multiples inter-connexions, les non-linéarités, les retards et les autres éléments de la complexité dynamique. Le champ causal ou le modèle mental de l'étape à laquelle l'action se déroule est cruciale dans la formation des jugements des gens sur la causalité (Einhorn et Hogarth 1986). Dans un

champ causal, les gens utilisent diverses signaux de la causalité y compris la proximité temporelle et spatiale de cause à effet, la préséance temporelle de causes, la co-variation et la similarité de cause et effet. Ces heuristiques conduisent à des difficultés dans les systèmes complexes où la cause et l'effet sont souvent distants dans le temps et dans l'espace, où les actions ont des effets multiples, et où les conséquences retardées et lointaines sont différentes et moins saillantes que les effets immédiats (ou simplement inconnus). Les réactions multiples dans des systèmes complexes amènent plusieurs variables à se mettre en corrélation, confondant ainsi la tâche consistant à juger la cause. Toutefois, les gens sont de piètres juges en matière de corrélation. Les expériences montrent que les gens peuvent généralement détecter les corrélations linéaires, positives parmi les variables si on leur fait faire suffisamment d'essais et si la réaction émanant du résultat est suffisamment exacte. Toutefois, nous avons beaucoup de difficultés en présence d'erreurs aléatoires, de corrélation non-linéaires et négatives, souvent nous n'arrivons jamais à découvrir le vrai rapport (Brehmer 1980).

Un principe fondamental des dynamiques de système veut que la structure du système détermine son comportement. Cependant, les gens ont une forte tendance à attribuer le comportement des autres à des facteurs liés à la disposition plutôt qu'à des facteurs de circonstance, c'est-à-dire, au caractère et spécialement aux défauts de caractère plutôt qu'au système dans lequel ces personnes agissent. La tendance à rejeter la responsabilité de l'échec à la personne plutôt qu'au système est si puissant que les psychologues l'appellent « **l'erreur d'attribution fondamentale** » (Ross 1977). Dans les systèmes complexes, diverses personnes placées dans la même structure ont tendance à se comporter de façon similaire. Lorsque nous attribuons le comportement à la personnalité, nous perdons de vue la façon dont la structure du système a façonné nos choix. L'attribution du comportement aux individus et aux circonstances spéciales plutôt que la structure du système détourne notre attention des points à haut effet de levier où la ré-conception du système ou de la politique directrice peut avoir des effets significatifs, durables et bénéfiques sur la performance (Forrester 1969, chap. 6 : Meadows 1982). Lorsque nous attribuons le comportement aux personnes plutôt qu'à la structure du système, l'objectif principal de la direction devient la désignation d'un bouc émissaire et le rejet de la responsabilité sur quelqu'un plutôt que l'analyse critique du plan des organisations dans lesquelles les gens ordinaires peuvent atteindre des résultats extraordinaires. 11

### 1.3.6. Dédutions erronées à propos des Dynamiques

Même si nos cartes cognitives de la structure causale étaient parfaites, l'apprentissage, surtout l'apprentissage à double-boucle, serait malgré tout difficile. Pour utiliser un modèle mental afin de concevoir une nouvelle stratégie ou organisation, nous devons faire des suppositions sur des conséquences des règles de décision qui n'ont jamais été essayées et pour lesquelles nous n'avons aucune donnée. Pour ce faire, il nous faut une solution intuitive d'équations différentielles non-linéaires de premier ordre, une tâche dépassant de loin les capacités cognitives humaines sauf dans les systèmes les plus simples (Forrester 1971 a ; Simon 1982). Dans plusieurs études expérimentales, y compris Diehl et Sterman (1995) et Sterman (1989 a), les participants avaient eu une pleine connaissance de tous les rapports et paramètres structuraux, ainsi qu'une connaissance parfaite, détaillée et immédiate de toutes les variables. En outre, les systèmes étaient si simples que le nombre de variables à prendre en compte était réduit. Pourtant la performance était faible et l'apprentissage aussi. La mauvaise prestation dans ces tâches est due à notre incapacité à faire des déductions raisonnables à propos des dynamiques du système malgré une connaissance parfaite et complète de la structure du système.

Les personnes ne peuvent même pas simuler mentalement le plus simple système de réaction possible, la boucle de réaction positive linéaire de premier ordre (12). De tels processus de réaction positive sont courants, de la composition d'intérêt à la croissance de la population. Wagenaar et Sagaria (1975) et Wagenaar et Timmers (1978, 1979) ont indiqué que les gens sous-estiment la croissance exponentielle de façon significative, tendant à extrapoler de façon linéaire plutôt que de façon exponentielle. L'utilisation d'un plus grand nombre de points de données ou la confection de FIGURES de données n'ont rien servi, la formation en mathématique, n'a non plus pas amélioré les prestations.

La rationalité limitée ou bornée oblige simultanément la complexité de nos cartes cognitives et notre capacité à les utiliser pour anticiper les dynamiques du système. Les modèles mentaux, dans lesquels le monde est perçu comme une séquence d'événements et dans laquelle la réaction, la non-linéarité, les retards et les conséquences multiples font défaut, conduisent à une faible prestation lorsque ces éléments de complexité dynamique sont présents. Un dysfonctionnement dans les systèmes complexes peut naître de la mauvaise perception de la structure de réaction de l'environnement. Mais les modèles mentaux riches qui reproduisent ces sources de complexité ne peuvent pas être utilisés de façon fiable pour comprendre la dynamique. Un dysfonctionnement dans les systèmes complexes peut naître de la simulation mentale erronée de la mauvaise perception de la dynamique de réaction. Ces deux différentes contraintes sur la rationalité doivent toutes être surmontées pour permettre un apprentissage efficace. Les modèles mentaux parfaits sans une capacité de simulation produisent peu de compréhension ; un calcul pour des déductions fiables à propos de la dynamique donne des résultats systématiquement erronés lorsqu'il est appliqué aux modèles simplistes.

### **1.3.7. Raisonnement non-scientifique : Erreurs de Jugement et partialités**

Pour apprendre efficacement dans un monde de complexité dynamique et d'information imparfaite, les personnes doivent développer ce que Davis et Hogarth (1992) appellent « Compétences de compréhension » - les compétences qui aident les gens à apprendre lorsque la réaction est ambiguë :

*[L'] Interprétation de la réaction ...doit être une tâche active et disciplinée régie par les règles rigoureuses de la déduction scientifique. Les croyances doivent être contestées en recherchant des preuves de dé-confirmation possibles et en demandant si les croyances alternatives ne pourraient pas expliquer les faits (mettre l'accent sur l'original).*

Malheureusement, les personnes sont de piètres scientifiques intuitifs, qui n'arrivent pas généralement à raisonner conformément aux principes de la méthode scientifique. Par exemple, les gens ne fournissent pas d'explications alternatives suffisantes ou ne prennent pas suffisamment en compte des hypothèses contradictoires. Généralement les gens ne maîtrisent pas de manière adéquate les variables qui confondent lorsqu'ils explorent un environnement nouveau. Les jugements des gens sont fortement affectés par le cadre dans lequel l'information est présentée, même quand l'information objective demeure inchangée. Les gens souffrent d'excès de confiance en leurs propres jugements (sous-estimant l'incertitude), prennent leurs désirs pour des réalités (évaluer les résultats souhaités comme plus probable que les résultats non souhaités), et ont l'illusion de la maîtrise (croire que l'on peut prédire ou influencer le résultat des événements aléatoires).

Les personnes violent les règles de base de la probabilité, ne comprennent pas les concepts statistiques de base tels que la régression vers la moyenne, et ne réactualisent pas les croyances selon la règle de Bayes. La mémoire est déformée par le recul, la disponibilité et la pertinence des exemples, et l'apparence des résultats. Ainsi de suite. Hogarth (1987) traite de 30 erreurs et tendances documentées dans la recherche de prise de décision et fournit un bon guide à la littérature (voire également Kahneman, Slovic et Tversky 1982). La recherche montre de façon convaincante que les scientifiques et les professionnels, pas uniquement les gens « ordinaires », souffrent de plusieurs de ces partialités dans le jugement.

Parmi les échecs du raisonnement scientifique plus hostile à l'apprentissage, il y a la tendance à rechercher des preuves conformes aux croyances actuelles plutôt que l'infirmité potentielle (Einhorn et Hogarth 1978 ; Klayman et Ha 1987). Dans une célèbre série des expériences, Wason et Collègues ont présenté les tâches des gens comme indiqué au tableau 1-13.13. Avant de continuer, essayez le défi indiqué au FIGURE.

Figure 1-13

**CHALLENGE**

**Hypothesis Testing**  
You are shown these four cards. Each card has a letter on one side and a number on the other. What is the smallest number of cards you should turn over to test the rule that cards with vowels on one side have even numbers on the reverse? Which are they?

**FIGURE 1-13**  
Wason card puzzle

E

K

4

7

Dans une version, on vous montre un côté de quatre cartes, chacune comportant une lettre sur un côté et un chiffre sur l'autre, par exemple, E, K, 4 et 7. On vous dit que si une carte porte une voyelle, alors elle a un chiffre pair sur l'autre face. Vous devez ensuite identifier la plus petite gamme de cartes à retourner pour voir si la règle proposée est correcte.

Wason et Johnson-Laird (1972) ont révélé que la grande majorité de sujets ont choisi E ou E et 4 comme réponses. Moins de 4 % ont donné la bonne réponse : E et 7. La règle a la forme logique si – **p**, alors **q**. La falsification exige une observation de **p** mais pas – **q**. L'unique carte qui montre **p**, c'est la carte E, donc elle doit être examinée (le verso de la carte E doit comporter un chiffre égal pour que la règle tienne). La seule carte montrant **pas –q**, c'est la 7, donc elle aussi doit être examinée. Les cartes K et 4 ne sont pas pertinentes. Cependant, les gens choisissent constamment la carte qui porte la lettre **q**, un choix qui ne peut que fournir des données conformes à la théorie, mais ne peut pas la tester ; si le verso de 4 est une consonne, vous n'avez rien appris, puisque la règle ne dit rien à propos des chiffres/nombres associés aux consonnes. Les expériences montrent que la tendance à rechercher la confirmation est forte au vu de la formation en logique, mathématique et statistique. Les stratégies de recherche qui se focalisent uniquement sur la confirmation des croyances actuelles ralentissent la génération et la reconnaissance des anomalies qui pourraient conduire à l'apprentissage, particulièrement l'apprentissage à double-boucle.

Certains soutiennent que pendant que les gens se trompent en appliquant les principes de la logique, au moins les gens demeurent raisonnables en ce sens qu'ils apprécient l'importance de l'explication scientifique. Malheureusement, la situation est bien pire. La vision-mondiale raisonnable et scientifique constitue un développement récent dans l'histoire de l'humanité et demeure rare. Plusieurs personnes placent leur foi en ce que Dostoyevsky's Grand Inquisiteur appelle « miracle, mystère, et autorité », par exemple, l'astrologie, ESP, UFOs, le créationnisme, les théories du complot de l'histoire, la canalisation des vies passées, les leaders de culte promettant les visions d'Armageddon et d'Elvis. La persistance de telles croyances superstitieuses dépend en partie de la tendance vers les preuves de confirmation. Wade Boggs, l'ancien champion de batte des Boston Red Sox, mangeait des poulets tous les jours pendant plusieurs années parce que une fois il a passé une très bonne journée au plat après un dîner aux poulets au citron (Shaughnessy 1987). Pendant cette période, Boggs a gagné cinq (5) championnats de batte, démontrant ainsi la sagesse de la « théorie du poulet ». Envisageons la popularité grandissante de l'astrologie, de la physique et des prévisions économiques, qui publient leurs succès et suppriment leurs échecs (plus nombreux). Rappelons que le 40<sup>ème</sup> Président des Etats-Unis et Première Dame a géré les affaires de l'Etat sur la base de l'astrologie (Robinson 1988). Et cela a marché : Il a été réélu par une raz de marée.

Mis à part de telles folies, il y existe des raisons plus profondes et plus troublantes pour la prévalence de ces échecs d'apprentissage et des superstitions qu'elles engendrent. Les êtres humains sont plus que des utilisateurs d'informations cognitives. Nous avons fort besoin de nourriture émotionnelle et spirituelle. Mais à partir du héliocentrisme Copernicien en passant par l'évolution, la relativité, la

mécanique quantique et l'incertitude Godelienne, la science s'est débarrassé des croyances anciennes et réconfortantes tout en plaçant l'humanité au centre d'un univers raisonnable conçu pour nous par une autorité suprême. Pour beaucoup de gens, la pensée scientifique ne conduit pas à l'éclairage ni à la responsabilisation mais conduit à l'angoisse existentielle et à l'absurdité de l'insignifiance humaine dans un univers incompréhensiblement vaste. D'autres croient que la science et la technologie constituaient les troupes de choc pour le triomphe du Matérialisme et de l'Instrumentalisme sur le sacré et le spirituel. Ces réactions anti-scientifiques constituent des forces puissantes. Elles constituent des vérités importantes à plus d'un titre. Elles ont conduit à la plupart des travaux d'art et de littérature les plus complexes. Mais elles peuvent également conduire au jargon de psychologie gratuit du Nouvel Age.

Le lecteur ne devrait pas conclure à partir de cette discussion que je suis un défenseur naïf de la science comme elle est pratiquée ni un défenseur du dégât réel et continu causé à l'environnement et à nos vies culturelles, morales et spirituelles au nom de la rationalité et du progrès. Au contraire, j'ai mis l'accent sur la recherche qui montre que les scientifiques sont souvent enclins aux erreurs de jugement et aux tendances discutées ci-dessus comme les profanes. C'est précisément parce que les scientifiques sont soumis aux mêmes limites cognitives et échecs moraux comme les autres que nous connaissons des abominations telles celles qui amené le Gouvernement Américain à financer des recherches au cours desquelles du plutonium a été injecté aux malades graves, et au cours desquelles le calcium radioactif a été administré aux enfants attardés, sans leur connaissance ou leur consentement (Mann 1994). Un principe central de la dynamique du système c'est d'examiner les questions à partir de perspectives multiples ; d'étendre les frontières de nos modèles mentaux afin de prendre en compte les conséquences à long-terme et les « effets secondaires » de nos actions, y compris leurs implications environnementales, culturelles et morales (Meadows, Richardson et Bruckmann 1982).

### **1.3.8. Routines défensives et Obstacles interpersonnels à l'apprentissage**

L'apprentissage par groupes, que la dynamique du système soit utilisé ou pas, peut être contrarié même si les participants reçoivent d'excellentes réactions d'information et raisonnent bien en tant qu'individus. Nous nous fions à nos modèles mentaux pour interpréter le langage et les actes des autres, construire le sens et déduire des motivations. Cependant, comme le soutient Forrester (1971),

- Le modèle mental est flou. Il est incomplet. Il est mal formulé. En outre, à l'intérieur d'un individu, un modèle mental change avec le temps et même lors d'une seule conversation. Le cerveau humain rassemble quelques rapports pour convenir au contexte d'une discussion. Si le sujet change, le modèle change aussi ... Chaque participant dans une conversation emploie un modèle mental différent pour interpréter le sujet. Les hypothèses fondamentales diffèrent mais ne sont jamais présentées au grand jour.

Argyris (1985), Argyris et Schon (1978), Janis (1982), Schein (1969, 1985, 1987), et autres documentent les routines défensives et les hypothèses culturelles sur lesquelles les gens se fondent, souvent sans le savoir, pour interagir et interpréter les expériences des autres. Nous utilisons les routines défensives pour sauver la face, affirmer la domination des autres, faire en sorte que les déductions non testées ressemblent à des faits, et défendent nos positions alors qu'elles semblent être neutres. Nous faisons des attributions conflictuelles, non -exprimées des données que nous recevons. Nous ne parvenons pas à faire la différence entre les données sensorielles d'expérience et les attributions et généralisations que nous en faisons. Nous évitons de tester publiquement nos hypothèses et croyances et évitons les questions menaçantes. Par dessus tout, le comportement défensif implique le fait d'étouffer le caractère défensif et de rendre ces questions indiscutables, même lorsque toutes les parties sont conscientes de leur existence.

Les routines défensives sont subtiles. Elles arrivent souvent empreintes de préoccupation et de respect apparents pour les autres. Prenons la stratégie appelée « l'approche en douce » :

***Si vous êtes sur le point de critiquer quelqu'un qui pourrait se mettre sur la défensive et que vous voulez qu'il voit le point sans résistance excessive, il ne faut pas dire la critique ouvertement ; au contraire, il faut poser des questions qui, lorsqu'il les répond correctement, il comprendra ce que vous voulez dire sans l'avoir dit ouvertement (Argyris, Putnam, et Smith 1985, p.83).***

Mais souvent cette approche en douce ,

Crée la réaction défensive qu'il est sensé éviter, parce que l'intéressé comprend de façon typique que l'acteur est entrain de faire l'approche en douce. En effet, cette approche peut réussir uniquement si l'intéressé comprend qu'il est supposé répondre aux questions de façon particulière, et cela suppose la compréhension que l'acteur est en train d'évaluer négativement l'intéressé en agissant comme si ce n'était pas le cas (Argyris, Putnam, et Smith 1985, p.85).

Le comportement défensif, dans lequel les théories épousées que nous offrons aux autres diffèrent des théories que nous utilisons, freine l'apprentissage en cachant d'importantes informations aux autres, évitant de tester publiquement les hypothèses importantes, et en reconnaissant tacitement que nous ne voulons pas que nos modèles mentaux soient contestés. Les routines défensives amènent souvent à penser en groupe (Janis 1982), là où les membres du groupe renforcent mutuellement leurs croyances actuelles, taisent leurs dissensions et se renferment contre ceux qui ont des points de vue différents ou des preuves d'infirmité possibles. Les routines défensives assurent que les modèles mentaux des membres de l'équipe demeurent mal formés, ambigus et cachés. Ainsi, l'apprentissage par groupe peut souffrir même au-delà des obstacles à l'apprentissage individuel

### **1.3.9. Echec de la Mise en Œuvre**

Dans le monde réel, les décisions sont souvent appliquées de façon imparfaite, bloquant davantage l'apprentissage. Même si une équipe convient d'une marche à suivre, l'application de ces décisions peut être retardée et déformée pendant que l'organisation réelle répond. Les motivations locales, les informations asymétriques, et les agendas privés peuvent amener les agents à jouer un jeu à travers le système. Evidemment les échecs de la mise en œuvre peuvent porter préjudice à l'organisation.

L'application imparfaite peut faire avorter le processus d'apprentissage également, parce que l'équipe dirigeante qui évalue les résultats de leurs décisions peut ne pas savoir en quoi les décisions qu'elle pense être entrain d'appliquer sont déformées.

Enfin, dans le monde réel fait d'actions irréversibles et de grands enjeux, la nécessité de maintenir la performance ou la prestation prime souvent sur la nécessité d'apprendre en supprimant de nouvelles stratégies même si elles causent un tort même si elles pourraient susciter une grande compréhension et prévenir du mal dans l'avenir.

## **1.4 Exigences Pour Un Apprentissage Réussi Dans Les Systemes Complexes**

Nous faisons face à de grands obstacles à l'apprentissage dans les systèmes complexes comme les pays ,les sociétés, les familles. Chaque lien dans la boucle de réaction par laquelle nous pourrions apprendre peut être affaibli ou rompu par une variété de structures .Quelques unes de ces boucles ont des caractéristiques physiques ou institutionnelles de l'environnement-Les éléments de la complexité dynamique qui réduisent les opportunités pour l'expérimentation contrôlée, nous empêchent d'apprendre les conséquences de nos



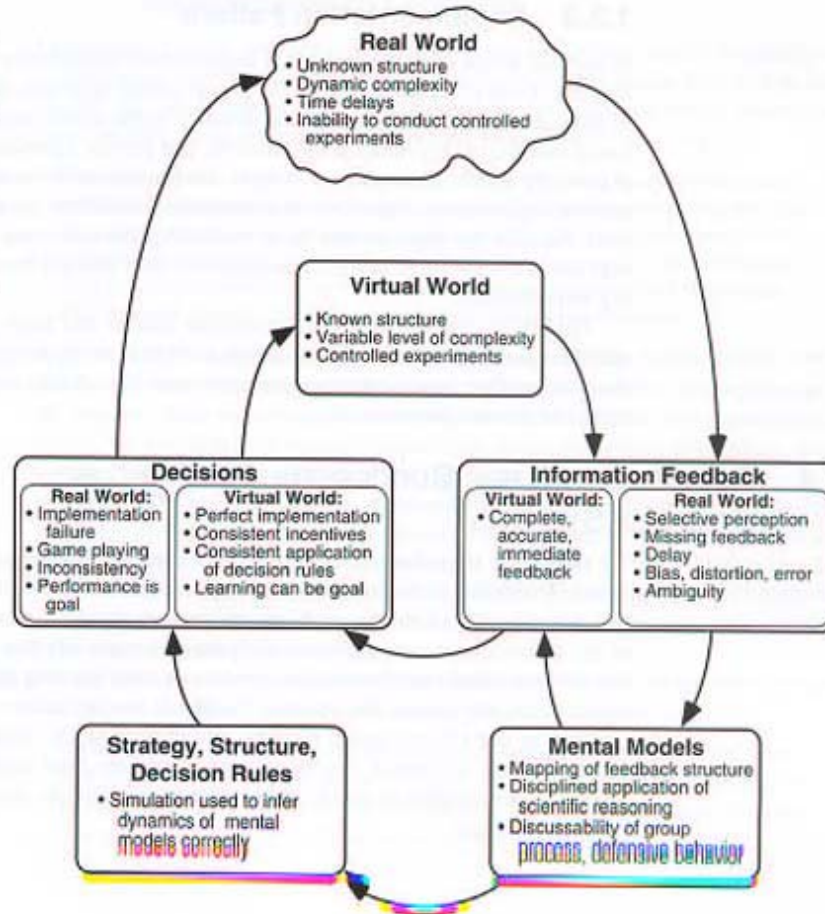
actions, et déforment la réaction attendue que nous recevons .Certains sont des conséquences de notre culture, du processus de groupe et les aptitudes pour les enquêtes. D'autres encore sont des bornes fondamentales des liens avec la cognition humaine, particulièrement la faible qualité de nos cartes mentales et notre incapacité à faire des déductions appropriées sur la dynamique des systèmes complexes non-linéaires

#### **1.4.1 Amélioration du processus d'apprentissage: les vertus des mondes virtuels**

Quelles sont alors les exigences pour réussir un apprentissage dans les systèmes complexes ? Si nous devons élaborer des protocoles et des instruments importants pour que l'apprentissage soit efficace dans un monde à complexité dynamique, nous devons faire face à tous les blocages à l'apprentissage. La Figure 1-14 montre comment les réactions issues de l'apprentissage se produiront lorsque tous les obstacles à l'apprentissage seront levés. Le diagramme montre une nouvelle boucle de réaction créée par l'utilisation des mondes virtuels Les Mondes Virtuels (le terme est de Schon I 1983 I ) sont des modèles formels, des simulations formelles ,ou des ‘ micromondes’’ (Papert 1980 ), dans lesquels les décideurs peuvent peaufiner leurs compétences en matière de prise de décision, mener des expériences , et jouer. Ils peuvent être des modèles physiques, des jeux de rôles, ou des simulations informatiques. Dans les systèmes à complexité dynamique significative, on aura besoin de la simulation informatique (bien qu' il y a des exceptions notables, comme le Jeu de la Distribution de Bière (Sternan1989b ) et le Jeu de Maintenance décrit dans la section 2.4, en même temps que les hybrides d'ordinateur du Jeu de Rôle comme les Banques de Poissons ,Ltd (Meadows, Fiddaman et Shannon 1993 ).Beaucoup de ces outils de la dynamique des systèmes sont conçus pour vous aider à développer des modèles utiles, fiables, et efficaces pour servir comme des mondes virtuels et aider à l'apprentissage et à la conception de la politique.

**Figure 1-14**

**FIGURE 1-14**  
Idealized learning  
process  
Effective learning  
involves  
continuous  
experimentation  
in both the virtual  
world and real  
world. Feedback  
from both informs  
the development  
of mental  
models, formal  
models, and  
the design of  
experiments for  
the next iteration.



Les mondes virtuels ont plusieurs vertus. D'abord, ils fournissent des laboratoires à faibles coûts pour l'apprentissage. Le Monde Virtuel prévoit de l'espace pour la compression et la dilatation. Les actions peuvent être répétées dans les mêmes conditions ou dans des conditions différentes. On peut arrêter les actions pour réfléchir. Les décisions dangereuses non réalisables ou non éthiques dans le système réel qui peuvent être prises dans le monde virtuel. Ainsi, l'expérimentation contrôlée devient possible et les retards de temps dans la boucle d'apprentissage à travers le Monde réel sont considérablement réduits. Dans le monde réel, l'irréversibilité de plusieurs actions et le besoin de maintenir des grandes performances surpassent souvent le but de l'apprentissage en prévenant des expériences avec des possibilités non testées (Si ce n'est pas brisé, il ne faut pas le fixer). Dans le monde virtuel, vous pouvez essayer des stratégies qui selon vous sont susceptibles de conduire à de faibles performances ou même (simulées) catastrophiques. En poussant souvent un système dans des conditions extrêmes, on se fait révéler beaucoup d'informations sur sa structure et sa dynamique que les ajustements à la hausse pour des stratégies de succès. Les Mondes Virtuels constituent la seule voie pratique pour faire l'expérience des catastrophes avant même que le phénomène en question ne se produise. Ainsi, une bonne partie du temps que les pilotes passent dans les simulateurs de vol se fait dans des conditions extrêmes comme la panne de moteur ou la décompression explosive.

Les mondes virtuels fournissent une réaction de haute qualité. Dans le simulateur de vol de management rapide des gens (Sterman 1988a), par exemple, et dans d'autres simulateurs de

systèmes dynamiques, les joueurs reçoivent une réaction de résultats parfaite, immédiate, non déformée et complète. En un après midi, on peut obtenir des années d'expérience de simulation. Le degré de variation aléatoire dans le monde virtuel peut être contrôlé. Les mondes virtuels offrent à l'apprenant un plus grand contrôle sur la stratégie, conduit à une plus prise de décision cohérente, et empêche l'échec de mise en œuvre et les jeux. A la différence du monde réel, qui, comme une boîte noire, a une faible structure de résolution, les mondes virtuels peuvent être des boîtes ouvertes dont les hypothèses sont pleinement connues et peuvent même être modifiées par l'apprenant.

Les mondes virtuels pour l'apprentissage et la formation sont devenus monnaie courante dans l'armée, la formation des pilotes, les opérations de centrales électriques et dans beaucoup d'autres tâches en temps réel où les opérateurs humains interagissent avec des systèmes techniques complexes. Les Mondes Virtuels sont aussi largement utilisés dans les professions comme l'architecture et l'ingénierie qui se prêtent bien à l'utilisation de modèles physiques (Schon 1983). L'usage des mondes virtuels dans les tâches de gestion où la simulation est comprimée en des dynamiques de minutes ou d'heures s'étendant sur des années et des décennies, est plus récent et moins largement adopté. Cependant, ceux-ci sont précisément

Le milieu où la complexité est la plus problématique, où les réactions d'apprentissage décrits ci-dessus sont moins efficaces, et où les enjeux sont les plus importants.

### **1.4.2 Les pièges des mondes virtuels**

Les mondes virtuels sont efficaces quand ils engagent les gens dans ce que Dewey appelait « la pensée réflexive » et ce que Schon (1992) appelle « la conversation réflexive avec la situation ». Bien que les modèles de pensée et de simulation et les mondes virtuels peuvent être nécessaires pour un apprentissage efficace dans les systèmes de complexité dynamiques, ils ne sont pas suffisants pour surmonter les défauts de nos modèles mentaux, compétences scientifiques de raisonnement, et les processus de groupe.

Evidemment, bien que le monde virtuel permet une expérimentation contrôlée, il ne requiert pas à l'apprenant d'appliquer les principes de la méthode scientifique. Beaucoup de participants aux projets des dynamiques des systèmes n'ont pas la formation dans la méthode scientifique et les connaissances des pièges dans la conception et l'interprétation des expériences. Une conduite communément constatée parmi les modélisateurs et dans les ateliers utilisant les simulateurs de vol de la gestion est le syndrome de jeux vidéo dans lequel les gens jouent beaucoup et pensent très peu. Les gens ne prennent pas souvent le temps de réfléchir sur les conséquences d'une simulation, d'identifier les décalages entre les conséquences et leurs attentes, de formuler les hypothèses pour expliquer les décalages, et ensuite de mettre au point les expériences pour discriminer parmi les alternatives en compétition. Un apprentissage efficace faisant usage du système des dynamiques obligera souvent une formation des participants dans la méthode scientifique. Les protocoles pour l'utilisation des simulations doivent être structurés pour encourager une procédure claire, telle que la conservation des livrets de laboratoire, explicitement formuler les hypothèses et les présenter au groupe, et etc.

Les routines défensives et de réflexion de groupe peuvent être opérationnelles dans le laboratoire d'apprentissage juste comme dans l'organisation réelle. En effet, les protocoles pour un apprentissage efficace dans les mondes virtuels tels que les hypothèses de teste publique, responsabilité, et comparaison des différentes stratégies peuvent être lourdement menaçantes, suscitant les réactions qui empêchent d'apprendre (Isaacs et Senge 1992). L'utilisation des dynamiques de système pour stimuler l'apprentissage dans les organisations

oblige souvent les membres de l'équipe de client de passer le temps parlant de leur propre conduite défensive. Les gestionnaires non habitués à un raisonnement discipliné scientifique et à un environnement ouvert et de confiance dont l'objectif principal est l'apprentissage devront construire ces compétences de base pour que le modèle de système de dynamiques ou en effet, tout modèle- puisse être utile. Développer ces compétences nécessite un effort et une pratique.

Toutefois, les milieux qui ont une forte complexité dynamique peuvent dénaturer la conversation réflexive entre l'apprenant et la situation. Des longs délais, causes et effets qui sont distants dans le temps et l'espace, et les effets semant la confusion dans les multiples réactions non linéaires peuvent ralentir l'apprentissage même pour les personnes qui ont une bonne compréhension et des compétences de travail en groupe. L'apprentissage dans les mondes virtuels peut être accéléré quand le processus de modélisation aussi aide les gens à apprendre comment représenter les structures de réactions complexes et de comprendre leurs implications plutôt que de simplement présenter les résultats d'une analyse. Pour apprendre dans des systèmes dynamiquement complexes, les participants doivent avoir la confiance que le modèle est une présentation appropriée du problème qu'ils ont en main. Ils doivent croire qu'il imite les parties pertinentes du monde réel assez bien que les leçons découlant du monde virtuel s'appliquent à celui du réel. Pour développer une telle confiance le monde virtuel doit être une boîte ouverte dont les hypothèses peuvent être supervisées, critiquées et changées. Pour apprendre les participants doivent devenir des modélisateurs, pas simplement des joueurs dans un jeu de simulation.

En pratique, l'apprentissage efficace des modèles se déroule bien, et peut être seulement, quand les décideurs participent activement dans le développement du modèle. La modélisation ici comprend à la découverte des modèles mentaux existants des participants, comprenant la définition des problèmes (structuration des problèmes), la sélection de la limite du modèle et la période de temps fixée, et la cartographie de la structure causale du dit système. Parallèlement aux techniques développés dans le système des dynamiques, beaucoup d'outils et de protocoles pour constitution du modèle de groupe sont disponibles actuellement, y compris des diagrammes à boucles causales, les diagrammes à structure politique, la cartographie informatique interactive, et divers problèmes et méthodes de systèmes de logiciel et de structures (voir par exemple, Checkland 1981 ; Eden, Jones et Sims 1983 ; Lane 1994 ; Morecroft 1982 ; Morecroft et Sterman 1994 ; Reagan- Cirincione et al. 1991 ; Richmond 1987, 1993 ; Rosenhead 1989 ; Senge et Sterman 1992 ; et Wolstenholme 1990)

### **1.4.3 Pourquoi la simulation est essentielle**

Montrer et cartographier les modèles mentaux des participants, bien que nécessaire, est loin d'être suffisant. Comme discuté ci-dessus, les limites temporelles et spatiales de nos méthodes mentales tentent à devenir trop étroites. Elles sont dynamiquement déficientes, omettant les réactions, délais, accumulations, et les facteurs non linéaires. La grande vertu de beaucoup de protocoles et outils permettant de mieux exhiber est leur capacité à améliorer nos modèles en encourageant les gens à identifier les éléments de complexité dynamique normalement absents des modèles mentaux. Cependant, la plupart des méthodes de structuration de problème produisent des modèles qualitatifs montrant les relations de causalité mais omettant les paramètres, les formes fonctionnelles, les entrées externes, et les conditions initiales nécessaires pour spécifier totalement et tester le modèle. Quelque soit la forme du modèle ou la technique utilisée, le résultat du processus de cartographie ne va jamais au delà d'un poste d'attributions causales, les hypothèses initiales sur la structure d'un système, qui doit être ensuite testée.

La simulation est le seul moyen pratique de tester ces modèles. La complexité de nos modèles mentaux dépasse largement notre capacité de comprendre leurs implications. Des modèles conceptuels typiques tels que le type du diagramme causal montré dans la Figure 1-6 sont trop larges et complexes pour être simulés mentalement. Sans simulation, même les meilleurs modèles conceptuels ne peuvent être testés et améliorés qu'en se fiant à l'apprentissage par réactions à travers le monde réel. Comme on a vu, cette réaction est trop lente et souvent rendue inefficace par la complexité dynamique, délais de temps, les réactions inadéquates et ambiguës, compétences de raisonnement faibles, réactions défensives, et les coûts de l'expérimentation. Dans ces circonstances la simulation devient le seul moyen fiable de tester les hypothèses et d'évaluer les effets possibles des politiques.

Des universitaires soutiennent que la modélisation formelle peut bien fournir une précision quantitative dans les définitions du problème préexistant mais ne peut pas aboutir fondamentalement à de nouvelles conceptions (pour autres points de vues voir Dreyfus et Dreyfus 1986 et la discussion dans Lane 1994). Au contraire, en formalisant les modèles qualitatifs et en les testant à travers la simulation, on aboutit le plus souvent à des changements radicaux dans la manière dont nous comprenons la réalité. La simulation accélère et fortifie les réactions d'apprentissage. Les écarts entre les modèles mentaux et formels stimulent des améliorations dans les deux modèles, y compris des changements dans les hypothèses de base telle que la limite du modèle, la période de temps fixée, et les hypothèses dynamiques (voir Forrester 1985 et Homer 1996 pour la philosophie et les exemples). Sans la discipline et la contrainte imposée par le teste rigoureux permis par la simulation, il devient trop facile pour les modèles mentaux d'être mus par l'idéologie ou par un parti pris inconscient.

Certains soutiennent que la formalisation oblige le modélisateur à omettre des aspects importants du problème à préserver la possibilité de résolution et permettre aux théorèmes d'être prouvés ou d'omettre les variables "soft" pour lesquelles il n'y a pas de données numériques. Ceux-ci sont en effet des dangers. La littérature des sciences sociales est pleine de modèles dans lesquels des théorèmes élégants sont dérivés des axiomes contestables, où la simplicité domine l'utilité, et où les variables connues comme importantes sont ignorées parce que les données pour estimer les paramètres ne sont pas disponibles. La dynamique des systèmes a été conçu spécialement pour surmonter ces limitations et dès le début a mis l'accent sur le développement des modèles utiles; les modèles non limités par les demandes de la possibilité de résolution analytique, basés sur les hypothèses réalistes sur le comportement humaine, fondé sur le domaine de prise de décision, et utilisant totalement les données disponibles, non seulement les données numériques, en vue de spécifier et d'estimer les relations (voir Forrester 1961, 1987).

Certaines personnes ne croient pas que les modèles du comportement humain peuvent être développés. Les simulations et les systèmes techniques tels que le climat ou la raffinerie de pétrole sont basés sur les lois de physique bien comprises, mais, c'est démontré, il n'y a pas de lois fiables comparables du comportement humain. Ce point de vue surestime notre compréhension de la nature et sous-estime les régularités dans la prise de décision humaine. Comme Kenneth Boulding le dit « chaque chose qui existe est possible » Vous verrez beaucoup d'exemples de modèles de systèmes humains à travers ce livre ( voir aussi les modèles dans Levine et Fitzgerald 1992 ; Robert 1978 ; Langley et al. 1987 ; Sterman 1985 a ; Homer 1985 ; et beaucoup des models cités dans Sastry et Sterman 1993).

Est-il possible d'apprendre efficacement dans des milieux complexes sans simulation ? l'utilisation des méthodes de structuration de problème, des techniques de découverte, et autres méthodes qualitatives des systèmes peut-il permettre de surmonter les obstacles à

l'apprentissage ? Si l'intuition est un peu développée à un niveau plus élevé, si la pensée des systèmes est incorporée dans l'éducation pré universitaire un peu tôt, ou si on nous enseigne comment reconnaître un ensemble de « archétypes des systèmes » (Senge 1990), serons nous capables d'améliorer notre intuition sur les dynamiques complexes suffisamment pour rendre la simulation non nécessaire ?

La réponse est clairement non. Il est vrai que les techniques de la pensée sur les systèmes, y compris les dynamiques du système et les méthodes qualitatives comme les systèmes d'analyse soft (faciles), peuvent renforcer notre intuition au sujet des situations complexes, tout comme l'étude de la physique peut améliorer notre intuition sur le monde naturel. Comme Wolstenholme (1990) le soutient, les outils des systèmes qualitatifs devront être largement disponibles pour que ceux qui ont des connaissances limitées en mathématiques puissent en tirer profit. Je suis un grand défenseur de l'introduction de la dynamique des systèmes et des méthodes connexes à tous les niveaux du système éducatif. Même si nous commençons tous une étude sérieuse des physiques au niveau du jardin d'enfants et continuons jusqu'au doctorat, il est ridicule de supposer que nous pouvons prédire la survenance de l'ouragan ou de comprendre par l'intuition seulement ce qui arrivera quand deux galaxies font collision. Beaucoup de systèmes humains sont au moins tout aussi complexes. Même si les enfants apprennent à penser en termes de systèmes- un objectif que je pense est absolument important- il sera nécessaire de développer des modèles formels, résolus par la simulation, pour apprendre de tels systèmes.

-----

une telle connaissance des physiques de base est extrêmement nécessaire. Quand on pose la question « Si un bic tombe sur la lune, va t-il (a) flotter pour aller loin ; (h) flotter sur place ; (c) tomber sur la surface de la lune ? » 48 sur les 168 étudiants du cours de physique à l'Université de l'état de Iowa ont donné des réponses incorrectes. Les explications communes des étudiants étaient du genre « La gravité de la lune peut être négligeable » et « la lune est un vide, il n'y a pas de force externe sur le bic. Par conséquent, il flottera sur place » (Partee, communication personnelle, 1992).

Mieux encore, quand l'expérimentation dans les systèmes réels est impossible à faire, la simulation devient la principale, et peut être le seul moyen par lequel l'on peut découvrir soi-même comment les systèmes complexes fonctionnent. Autrement, ce serait l'apprentissage par cœur basée sur l'autorité du maître et du manuel scolaire, une méthode qui assombrit la créativité et ralentit le développement des compétences de raisonnement scientifique nécessaires pour apprendre sur la complexité.

Les implications pour ce livre sont claires. La dynamique des systèmes n'est pas un sport de spectateurs : tout au long du livre que j'avais essayer d'encourager ta participation active de vous, le lecteur. Vous rencontrerez des défis dans chaque chapitre- des exemples que vous devez envisager et ( y travailler pour vous-même, tel que le diagramme de la boucle causale de la poule et de l'œuf dans la figure 1-6 et le jeu casse-tête de la carte de Wason dans la figure 1-13. Certains d'entre eux sont suivis d'une réponse proposée. D'autres ne le sont pas. En travaillant sur le livre, prolongez les exemples. Construisez les modèles. Faites-en des expériences. Appliquez vos compétences aux nouveaux problèmes et aux nouveaux enjeux. Et, surtout amusez vous.

## 1.5 Resume

Les systèmes dynamiques complexes présentent de multiples barrières à l'apprentissage. Le défi pour l'amélioration de la manière par laquelle nous apprenons sur ces systèmes est un problème de systèmes classiques. Les dynamiques de système est une puissante méthode permettant d'avoir un aperçu utile sur les situations de complexité dynamique et de la

résistance aux politiques. Il est de plus en plus utilisé pour concevoir plus de politiques qui réussissent dans les compagnies et dans les milieux de formulation de politiques publiques. Cependant, aucune méthode n'est une panacée. Pour surmonter les barrières d'apprentissage il faut élaborer une synthèse de beaucoup de méthodes et de disciplines, de la mathématique et de l'informatique, de la psychologie et de théorie organisationnelle. Des études théoriques doivent être intégrées avec des travaux de terrain. Des interventions dans les organisations réelles doivent être soumises à une recherche de suivi rigoureuse.

Le domaine des dynamiques de systèmes est dynamique en soi. Des avancées récentes dans la modélisation interactive, les outils pour la représentation de la structure de réaction, et le logiciel de simulation permettent à n'importe quelle personne de s'engager dans le processus de modélisation. Les sociétés, universités, et écoles sont entrain de mener des expériences de manière intense. La bibliothèque des interventions réussies et la recherche perspicace est en pleine croissance. Des travaux approfondis sont nécessaires pour tester l'utilité des outils et protocoles, évaluer leur impact sur l'apprentissage individuelle et organisationnelle, et développer des moyens efficaces pour former d'autres à leur utilisation. Jamais, auparavant, les défis de notre monde de plus en plus dynamique n'ont été aussi importants. Jamais, auparavant, les opportunités n'ont été aussi grandes. C'est un moment exaltant pour apprendre à l'intérieur et au sujet des systèmes complexes.

15

Le CD ROM qui l'accompagne et le site web (<http://www.mhhe.com/sterman>) contiennent les modèles élaborés dans le logiciel de texte et de simulation que vous pouvez utiliser pour les faire exécuter et étendre leurs capacités

## 2

### La Dynamique des Systèmes en Action

*[La dynamique des systèmes] est une approche qui doit aider à résoudre d'importants problèmes de gestion au niveau le plus élevé... Résoudre des problèmes de moindre importance n'apporte qu'une satisfaction limitée. Très souvent les problèmes importants ne sont qu'un peu plus difficiles à résoudre que ceux sans importance. Beaucoup de [gens] préparent des résultats médiocres en fixant très bas les objectifs initiaux. Il faut avoir une attitude d'entrepreneur. On doit s'attendre à des améliorations majeures...L'attitude selon laquelle le but doit consister à expliquer un comportement, assez courante dans les milieux académiques, n'est pas suffisante. Le but doit être de trouver des politiques de gestion et des structures organisationnelles qui engendrent des réussites plus importantes].*

--- Jay W. Forrester (*Dynamique Industrielle*, 1961, p. 449)

Ce chapitre présente trois études de cas de l'application réussie de la dynamique des systèmes pour résoudre des problèmes importants du monde réel. Ces cas couvrent un nombre varié d'industries et de problèmes. Ils illustrent différents contextes de l'utilisation de la dynamique des systèmes et différents processus de modélisation, des modèles larges faisant une utilisation intensive des données aux modèles réduits, en passant par les simulateurs de vol de gestion interactifs et les jeux de rôle. Les cas illustrent la façon dont la dynamique des systèmes peut être utilisée pour aider à résoudre les problèmes à gros enjeu en temps réel. Ils illustrent les principes présentés dans le chapitre 1 et examinent plusieurs outils et méthodes présentés dans les chapitres suivants.

## 2.1 Applications De La Dynamique Des Systemes

La dynamique des systèmes a été appliquée à des problèmes allant de la stratégie des compagnies à la dynamique du diabète, de la course aux armements pendant la guerre froide entre les EU et l'URSS au combat entre le VIH et le système immunitaire de l'homme. La dynamique des systèmes peut être appliquée à tous systèmes dynamiques sur n'importe quelle échelle de temps et d'espace. Dans le monde des affaires et de la politique d'intérêt public, la dynamique des systèmes a été appliquée aux industries allant des avions au zinc et des problèmes allant du SIDA à la reforme du système d'assistance sociale. 1.

Elaborer un modèle perspicace est assez difficile, utiliser la modélisation pour aider à changer des organisations et à exécuter de nouvelles politiques est encore plus difficile. Le plus grand potentiel pour l'amélioration a lieu quand le processus de modélisation change des modèles mentaux profondément ancrés. Pourtant plus le modèle mental que vous remettez en question est fondamental, plus le client pourrait être sur la défensive. Pour résoudre le dilemme les clients doivent découvrir par eux-mêmes les aperçus à travers une participation active au processus de modélisation.

Ce chapitre présente trois études de cas illustrant le processus. Chacune de ces études aborde un problème important du monde réel. Chaque étude porte sur un contexte différent et utilise par conséquent une approche différente. Pourtant toutes les études sont parvenues aussi à impliquer les clients en tant que partenaires du processus de modélisation, à changer des modèles mentaux longtemps établis, et à générer des profits considérables.

## 2.2 Strategie De Location D'automobiles : Partis Aujourd'hui, De Retour Demain <sup>2</sup>

Dans les années 90 une nouvelle façon d'acheter les voitures a vu le jour aux Etats-Unis – les grands parcs automobiles de vente de véhicules d'occasion. Des chaînes nationales comme CarMax et AutoNation offraient une grande sélection de véhicules de modèle récent propres, au kilométrage réduit avec des garanties, des plans de secours routiers, et d'autres facilités traditionnellement disponibles seulement pour les acheteurs de nouveaux véhicules. Les ventes des grands concessionnaires automobiles progressèrent de zéro en 1992 à plus de 13 milliard \$ en 1998. Les vendeurs de voiture sur Internet commencèrent aussi à apparaître un peu partout. Beaucoup d'analystes soutiennent que la combinaison des grands parcs et des ventes sur Internet est à la base d'une révolution sur le marché de la vente en détail d'automobiles.

En 1995 certains hauts cadres de General Motors étaient inquiets quant à l'impact des grands parcs autos de vente de voitures d'occasion sur les ventes de nouvelles voitures. Les grands parcs allaient-ils réduire la part du marché de GM ? Allaient-ils provoquer une chute des prix ? Quelle pouvait être la réaction de GM ? Ron Zarella, alors vice président et directeur du groupe pour les ventes, le service, et le marketing des véhicules en Amérique du Nord (VSSM) et plus tard promu Président de GM pour l'Amérique du Nord, se devait de trouver une façon d'examiner ces questions.

Peu d'études pouvant aider sur le marché des voitures d'occasion étaient disponibles. Pendant plusieurs décennies l'association entre le marché des nouvelles voitures et celui des voitures d'occasion n'était pas très forte à cause seulement du fait que les gens avaient tendance à garder leurs voitures longtemps. Les études de marché au début des années 90 ont révélé que les acheteurs de véhicules neufs gardaient en moyenne leurs acquisitions pendant plus de 6



ans. La plupart des voitures d'occasion proposées à la vente avaient 4 ans ou plus et ne constituaient pas une alternative valable aux voitures neuves. Le modèle mental prévalant dans l'industrie automobile, y compris à GM, était que le domaine des compagnies automobiles était la vente de voitures neuves ; les véhicules vendus par les particuliers étaient vieux et appartenaient effectivement à un système séparé, le marché des voitures d'occasion. « En réalité il y a deux marchés – le marché des véhicules neufs et celui des véhicules d'occasion », selon le directeur général des opérations de vente à Ford cité par le The Wall Street Journal en 1994 (3 Juin, p. B1).

1 Richardson (1996), Roberts (1978), et Morecroft (1994), entre autres, donnent des exemples de l'application de la dynamique des systèmes à des problèmes importants dans un grand nombre d'industries et de problèmes de politique d'intérêt public. Mosekilde (1996) décrit son application à la physique et à la biologie. Ford (1999) décrit son application aux questions environnementales.

2 Cet exemple est basé sur les travaux du Centre d'Appui à la Stratégie de GM, dirigé par Nick Pudar. J'exprime ma reconnaissance à Nick et à GM pour m'avoir donné la permission de présenter l'exemple et à Nick et Mark Paich pour m'avoir aidé à préparer la présentation de l'exemple.

Zarella prit contact avec Vince Barabba, à l'époque directeur général de la Stratégie de la Compagnie et de l'élaboration de connaissance de l'organisation VSSM, et lui fit part des ses inquiétudes. Barabba, ancien patron du Bureau Américain des Recensements, a aussi dirigé le Centre d'Appui à la Décision (DSC) et a demandé à Nick Pudar, alors analyste en affaires au DSC, de réfléchir sur la question des grands parcs de vente de véhicules d'occasion. Le DSC est une structure interne mise en place par GM pour aider les cellules d'affaires et les équipes de projet au niveau de la compagnie à élaborer et à exécuter la stratégie de la compagnie. Le DSC utilise divers outils d'analyse, y compris la dynamique des systèmes. Plus qu'un simple groupe de modélisations d'analyse, le DSC développe une approche sophistiquée, le processus de décision par le dialogue, conçue pour créer le consensus qui mène à l'action, pas seulement l'analyse et les rapports. Barabba et Pudar décrivent le processus de décision par le dialogue comme un processus discipliné de prise de décision impliquant une série de dialogues structurés entre deux groupes responsables et exécutant le plan d'action résultant. Le premier groupe (le Conseil de Révision des Décisions) est constitué des différentes fonctions des décideurs. Le lien commun entre eux est leur autorité à allouer les ressources : les hommes, le capital, le matériel, le temps, le deuxième groupe (le Noyau) est constitué de ceux ayant un enjeu dans l'exécution.

Le dialogue entre les deux groupes, qui implique le partage et l'apprentissage pour chacun des groupes, se déroule en quatre étapes continues : 1) cadrer le problème ; 2) développer des alternatives ; 3) faire l'analyse ; 4) établir le lien. Chacune de ces quatre étapes est menée à terme par le Noyau et appuyée par des facilitateurs dotés d'outils d'analyse de décision. A la fin de chaque phase, les membres du noyau et les facilitateurs ont une session de dialogue avec les membres du Conseil de Révision des Décisions au cours de laquelle ils examinent ensemble les progrès. Dans une atmosphère d'enquête, les hauts cadres de la direction conversent avec une équipe multi-fonctionnelle de responsables sur un sujet d'importance stratégique mutuelle.

Pudar confia à Zarella qu'il lui faudra s'engager en faveur d'une réunion hebdomadaire de plusieurs heures pendant un mois « pour s'assurer que nous travaillons sur le vrai problème ». Bien que l'emploi de temps de Zarella fut très chargé il proposa à Barabba et Pudar une rencontre le jour suivant.

Pudar, en collaboration avec Mark Paich, consultant indépendant en dynamique des systèmes et professeur d'économie à l'Université du Colorado, Darren Post du DSC, et Tom Paterson (autre consultant au DSC) s'est battu pour développer un modèle de base du problème. Ce même après-midi Pudar et son groupe ont élaboré un diagramme simple représentant les stocks et les flux des voitures à travers les marchés des voitures neuves et d'occasion et certaines réactions pouvant leur être associées. Ils ont délibérément simplifié le diagramme, pour être sûr de pouvoir le terminer à temps et pour pouvoir l'expliquer clairement.

La même nuit Pudar développa un modèle de simulation simple et qui marche des interactions entre le marché des véhicules neufs et celui des véhicules d'occasion. Le modèle comprenait des secteurs pour les voitures neuves et les voitures d'occasion (reparties entre les véhicules GM et les véhicules non GM) et suivait les véhicules de la production jusqu'à la vente initiale ou la location, à la reprise, au marché des véhicules d'occasion, et finalement à la ferraille. Le même modèle suivait aussi le flux des consommateurs entrant et sortant du marché et comprenait un modèle du choix du consommateur simple pour les décisions d'achat de véhicules neufs / d'occasion. Pudar a utilisé les données à sa disposition et son sens du jugement pour estimer les paramètres.

La Figure 2-1 montre un diagramme simplifié du modèle initial. La structure en noir capte le modèle mental prévalant focalisé sur le marché des voitures neuves. Le côté gauche suit la trace les stocks et flux des véhicules. En partant du haut, le stock des voitures neuves invendues est augmenté par la production et réduit par les ventes nouvelles de voitures. Les nouvelles ventes de voitures augmentent le nombre des voitures de modèle récent sur la route. Les gens vendent ou échangent leurs voitures et achètent une nouvelle à une fréquence déterminée par le temps moyen de reprise.

La Figure 2-1 montre aussi les réactions principales sur le marché des voitures neuves. Les fabricants et les concessionnaires gardent un œil attentif sur le stock des voitures neuves. Un stock couvrant à peu près 45 jours établit un bon équilibre entre la sélection disponible dans les parcs auto des concessionnaires et les frais de possession. Un stock réduit affecte négativement les ventes parce que les voitures ne sont pas disponibles ; les stocks élevés réduisent considérablement les bénéfices des concessionnaires et des fabricants d'automobiles tandis que les frais de possession montent en flèche. Si le stock disponible dépasse le seuil normal, les responsables de la production réduisent la production, ce qui permet de faire revenir les stocks à un niveau normal. La réaction de la production par rapport au stock forme (l'équilibrage) négatif de la boucle des réactions B1 du Contrôle de la Production. Toutefois, les fabricants d'auto se méfient des réductions de la production dans tous les cas, ça prend du temps. Le retard dans l'ajustement de la production signifie que les stocks ont tendance à fluctuer autour des niveaux souhaités parallèlement à la variation de la demande.

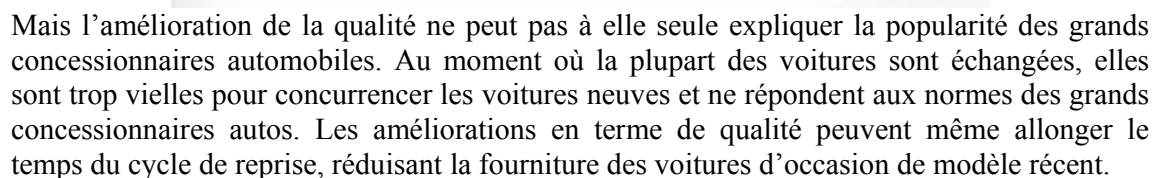
L'autre réaction majeure aux dépassements de stocks est une réduction des prix. Si la couverture des stocks est élevée, les concessionnaires sont plus enclins à réduire leurs marges bénéficiaires et les fabricants offrent des mesures incitatives telles que les remises de cash et les taux d'intérêt annuels réduits (APRs) sur les prêts financés à travers leurs divisions de crédit. Les réductions de prix rendent les voitures neuves plus attractives par rapport aux voitures qui sont déjà en circulation. Les gens échangent leurs voitures anciennes plus tôt, donnant un coup de pouce aux ventes de voitures neuves jusqu'au retour des stocks à la normale (la boucle négative B2 de Fixation des Prix).

## **2.2.1 Theorie Dynamique**

Remettant en cause l'opinion communément admise, l'équipe a élargi la structure du stock et des flux pour y inclure les véhicules d'occasion de modèle récent. Au lieu de disparaître, les reprises augmentent les stocks des voitures d'occasion de modèle récent dans les parcs auto ou ceux disponibles pour la vente aux enchères. A l'achat, ces voitures réintègrent le stock des voitures d'occasion de modèle récent sur la route. L'ensemble des voitures en circulation et des voitures dans les parcs des concessionnaires équivaut à l'ensemble des stocks des véhicules de modèle récent (illustré par le grand rectangle dans la Figure 2-1) ; ces voitures vieillissent progressivement et se retrouvent dans le lot des vieilles voitures et finissent éventuellement à la ferraille. Le modèle utilise une « chaîne de vieillissement » pour suivre les voitures en circulation et dans les stocks de voitures d'occasion en cohortes de 1 an. La chaîne de vieillissement (chapitre 12) permet à l'équipe d'examiner la façon dont le nombre des voitures de 1-, 2- et 3-ans en circulation et en vente évoluait par rapport aux ventes.

La perspective des stocks et des flux a motivé l'équipe de modélisation à se demander d'où les grands parcs tiraient les stocks importants de voitures attractives de modèle récent qu'ils réclamaient. Une réponse partielle était l'amélioration continue de la qualité des voitures neuves. Stimulés par la grande qualité des voitures étrangères, en particulier les voitures Japonaises, tous les fabricants d'automobiles avaient investi dans d'importants programmes de qualité. Bien qu'il existât toujours des possibilités d'amélioration, dans les années 90 la qualité et la durabilité des voitures neuves étaient considérablement plus grandes qu'au cours des années 80.

**FIGURE 2-1** A simple model of the automobile market



52

De la perspective du modèle mental prévalent, la location était avantageuse. En premier lieu, elle stimulait les ventes. Chaque fois que les stocks montent les fabricants d'automobiles peuvent augmenter les mesures incitatives en faveur de la location à travers des subventions de location. Les subventions réduisent les paiements de location en assumant des droits plus élevés, des taux d'intérêts réduits, ou une capitalisation initiale plus réduite ; typiquement, les fabricants d'autos élèvent les valeurs résiduelles au dessus des valeurs du guide des voitures d'occasion. Les paiements de locations réduits, augmentent l'attractivité des voitures neuves et induisent certaines personnes à échanger leur voiture actuelle contre un nouveau véhicule en location (formant la boucle B3 des Mesures Incitatives du location d'équilibrage dans la Figure 2-1). En second lieu, plus la durée moyenne de la location est courte, plus le temps d'échange est court et les ventes élevées (la boucle B4 d'équilibrage de la Périodicité de la Location). Si tous les nouveaux acheteurs de voitures choisissaient la location avec une périodicité moyenne de 3 ans, le temps du cycle de reprise diminuerait de moitié et les nouvelles ventes de voitures doubleraient – tout bien considéré.

L'équipe de modélisation ne tarda pas à mettre en doute l'hypothèse selon laquelle tout était bien considéré. Alors qu'une voiture de 6 ans n'est pas une alternative de qualité à une voiture neuve, une voiture de 1-à-3 ans avec un kilométrage réduit peut être attractive pour beaucoup de gens. Au moment où un volume croissant de locations arrive à terme le marché des voitures d'occasion peut être envahi par des voitures de bonne qualité presque neuves. Les prix des voitures d'occasion pourraient s'effondrer. Certaines personnes qui auraient pu échanger leurs voitures contre des voitures neuves optent plutôt pour des véhicules précédemment loués, augmentant le temps moyen de reprise et rajoutant un nombre plus élevé de voitures d'occasion de modèle récent au stock des voitures en circulation (la boucle d'équilibrage B5 du Marché des Voitures d'Occasion). La location réduit aussi le temps moyen du cycle de reprise, élevant la qualité des voitures d'occasion en vente. Un plus grand nombre de gens optent pour des voitures préalablement louées par location plutôt que de payer des voitures neuves. Le temps moyen de reprise pour la population dans son ensemble augmente, formant la boucle d'équilibrage B6 de la Qualité des Voitures d'Occasion. Plus intéressant encore, le marché des voitures d'occasion peut réagir pour affecter le lot des consommateurs qui choisissent de payer leur voiture à l'expiration de la location. Si, à la fin de la location, les prix des voitures d'occasion sont plus élevés que la valeur résiduelle inscrite dans la location, le client peut acheter la voiture à un prix inférieur à sa valeur marchande. La portion des consommateurs gardant leur voiture augmenterait. Toutefois, si le prix des voitures d'occasion chute en dessous de la valeur résiduelle, le lot des consommateurs gardant leur voiture diminuerait car un plus grand nombre de clients rendront leurs voitures au locataire. Le stock des voitures de modèle récent augmentera et le prix des voitures d'occasion chutera encore d'avantage, dans un cercle vicieux, la boucle positive R1 de l'Option d'Achat (s'auto consolidant).3.

Cependant, les réactions en gris agissent avec un long retard (presque égal à la périodicité moyenne du location) et n'étaient pas très bien comprises dans l'industrie. La location par vente stimule les ventes à court terme. Ignorant la structure apparaissant en gris dans la Figure 2-1, l'expérience du début des années 90 apprend aux fabricants de voitures que la location marche – et ils ont réorienté encore plus de dollars de marketing vers les subventions et sur le court terme.

Toutefois, les résultats initiaux suggéraient que la location créerait en fin de compte une surabondance de voitures de grande qualité presque neuves, causant une baisse des prix des voitures d'occasion de modèle récent. Les ventes de voitures neuves souffriraient d'autant qu'un nombre plus élevé de clients opteront pour les voitures de retour de location moins coûteuses. Les compagnies de crédit des fabricants d'automobiles (la Société d'Acceptation

de General Motors [GMAC], la Société de Crédit de Ford, et la Société de Crédit de Chrysler) subiraient des pertes à un moment où les valeurs marchandes seraient à la traîne des valeurs résiduelles retenues et au moment où moins des consommateurs utilisent leur option d'achat, rendant plutôt les voitures aux bailleurs.

Le jour suivant, Pudar et son équipe soumièrent ces résultats à Zarella, y compris la structure du modèle initial et les simulations montrant les problèmes pouvant être causés par une politique de location agressive. En réduisant les temps du cycle de reprise à travers la location et les ventes dans les parcs autos, les fabricants d'automobiles créaient une surabondance de voitures d'occasion de grande qualité à des prix attractifs. Les grands parcs autos étaient simplement la réponse du marché à l'opportunité créée par les fabricants eux-mêmes.

Les grands parcs autos de voitures d'occasion étaient seulement symptomatiques d'un problème plus profond- la politique de location des fabricants de voitures. La location augmente les ventes à court terme mais déclenche des réactions qui provoquent un effondrement des ventes quand les véhicules loués réintègrent le marché. Par le passé, les consommateurs gardaient assez longtemps leurs voitures au point que la reprise avait effectivement cessé d'être une préoccupation. Mais dans un monde de location à court terme, les voitures neuves qui quittent le parc aujourd'hui retournent demain.

3 La boucle de l'Option d'Achat est partiellement compensée parce que les consommateurs rendant leurs voitures aux bailleurs achètent un autre véhicule. Si les consommateurs loueurs utilisent leur option d'achat pour s'adonner à un jeu d'arbitrage pur quand les prix des voitures d'occasion chutent en dessous des valeurs résiduelles en achetant immédiatement des voitures identiques à des prix marchands moins élevés après avoir rendu leurs voitures, alors l'effet net des changements au niveau de la fraction de rétention serait zéro. Cependant, certains consommateurs en rendant leurs voitures aux bailleurs achètent une voiture neuve ou une voiture d'occasion différente, peut-être auprès d'un concurrent. Nettement une fraction de rétention moins grande pour une marque et un modèle tend à faire baisser d'avantage les prix pour cette voiture, provoquant une rétention même plus réduite. Ces effets ont été introduits dans le modèle complet mais pour des raisons de clarté n'apparaissent pas sur la Figure 2-1.

La réalisation que les grands parcs autos étaient une conséquence endogène des actions des fabricants d'automobiles eux-mêmes a redéfini de façon dramatique le point d'intérêt de la réflexion. L'analyse du modèle initial recommandait que GM cesse ses efforts en faveur de la location, une position exactement contraire aux tendances dans l'industrie.

Les effets peuvent paraître évidents (surtout maintenant que vous avez lu la description du modèle ci-dessus), et les directeurs de l'industrie automobile ignoraient que certaines voitures préalablement louées réintégreraient le marché. Cependant, la plupart n'ont pas tenu compte de la possibilité de problèmes. En 1994, USA Today a cité un responsable de la location qui affirmait : « La demande pour les voitures de retour de la location est trois fois plus élevée que l'offre. Les voitures en fin de location ont créé un goulot d'étranglement dans l'industrie » (2 Novembre). Un concessionnaire Cadillac de Detroit a rejeté tous liens entre le marché des voitures neuves et celui des voitures d'occasion pour les voitures de haut de gamme, affirmant sur un ton moqueur « Vous ne convaincrez jamais un acheteur de voitures de luxe de payer une voiture avec 30.000 mile au compteur » (le The Wall Street Journal, 3 Juin 1994). Dans le même article, le Journal poursuivit en notant que le directeur général des opérations de vente à Ford défend l'argument selon lequel l'industrie a connu une pénurie chronique de voitures de deux ans d'âge de bonne qualité à vendre. .. 'Cette [location à court terme] fait revenir les voitures juste au bon moment, quand la demande est la plus élevée],

affirme-t-il. De plus, le marché des voitures d'occasion est au moins deux fois aussi important que le marché des voitures neuves et peut facilement absorber les volumes prévus.

La force sous-jacente de la demande pour les voitures d'occasion absorbera de façon sûre le volume des véhicules d'occasion revenant en fin de location, sans cannibaliser les ventes de voitures neuves », prédit ...[un] analyste en sécurités automobiles à Salomon Bros.

D'amples données semblent appuyer ces points de vue. Les ventes de voitures d'occasion ont augmenté de 37,5 million en 1990 à près de 42 million en 1995 alors que les ventes de voitures neuves s'élevaient à peu près à 15 million, une augmentation d'à peu près 1 million seulement de véhicules par an depuis 1990. Le prix des voitures d'occasion a augmenté de plus de 6% par an entre 1990 et 1995, beaucoup plus rapidement que l'inflation. Avec la montée des prix des voitures d'occasion, de plus en plus de gens ont opté de garder leurs voitures à l'expiration de leur location. Beaucoup dans l'industrie, y compris GM, ont soutenu qu'une demande soutenue et une valeur croissante des voitures d'occasion justifiaient des valeurs résiduelles même plus élevées, permettant des paiements de location plus réduits et donnant un coup de pouce aux nouvelles ventes de voitures.

Alors que les résultats initiaux intriguaient, un travail supplémentaire était nécessaire avant de pouvoir faire des recommandations de politiques, encore moins d'agir. Même si la location était une mauvaise affaire, chaque fabricant d'automobiles se sentait obligé de rivaliser avec les périodicités et les prix de ses concurrents. Une fois que tous les grands fabricants ont commencé à offrir des périodicités de location courtes avec des subventions agressives, se retirer de façon unilatérale de la location risquait de causer la perte d'une trop grande part du marché. Zarella demanda à l'équipe de continuer la modélisation et de s'occuper de ces points. Le DSC constitua un conseil de révision des décisions, présidé par Zarella et Barraba, pour superviser le processus et l'équipe de modélisation entreprit alors d'affiner le modèle et de réunir les données nécessaires pour le calibrer. Elle disposait de 20 jours.

### **2.2.2 Elaboration Du Modele**

L'équipe de modélisation a interviewé les gens à travers l'organisation pour comprendre les problèmes et réunir les données. A travers les rencontres des équipes principales et de modélisation le modèle a été soumis à un examen critique et les résultats intérimaires ont été débattus.

Un point à améliorer était la gestion de la concurrence et la segmentation du marché en divers types de véhicules. Certains défendirent une gestion explicite de chaque fabricant et de chaque segment important du marché. La fidélité à la marque est importante : les gens ayant choisi une voiture de GM avant sont plus susceptibles d'acheter une autre voiture GM que ceux ne possédant pas de voitures GM. Ils soutinrent aussi que les clients de GM étaient différents des clients de Ford ou de Honda et que les marchés des voitures de luxe, les berlines familiales, les véhicules tout terrain, etc. étaient tous différents. L'équipe répliqua que les exigences de données pour un modèle aussi détaillé seraient énormes et retarderaient le développement d'un modèle utile. Elle préférait une approche itérative, avec une dissolution limitée ; si les analyses de sensibilité révélaient que des segmentations supplémentaires étaient nécessaires, elle pourrait alors réviser le modèle pour y inclure d'autres détails. L'équipe accepta de diviser le marché en véhicules GM et non GM mais de représenter seulement un ensemble unique de type de véhicules.

Un autre point de discussion important était la dissolution de la base des consommateurs. Parallèlement au flux des voitures entre les stocks « en circulation » et ceux « à vendre » se

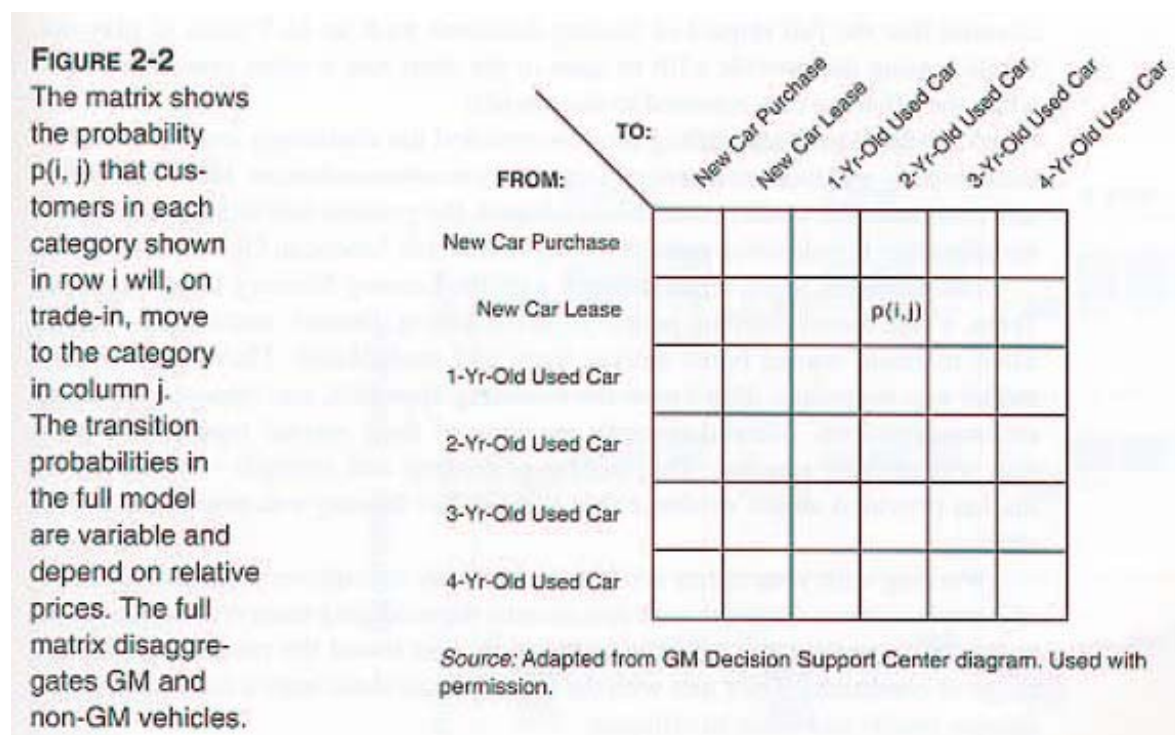
trouvent les stocks et les flux des conducteurs. Chaque voiture échangée déplace le consommateur de « en circulation » à « sur le marché », chaque voiture neuve ou d'occasion vendue met un autre conducteur sur la route. Les changements au niveau de l'attractivité des voitures neuves et d'occasion provoquent des changements dans la proportion des conducteurs sur le marché optant pour une voiture neuve. Le choix entre une voiture neuve et une voiture d'occasion dépend aussi du comportement passé de la voiture. Les chances de voir un consommateur louer par location, acheter nouveau, ou acheter une voiture d'occasion dépendent de si le consommateur en question avait loué, ou acheté une voiture d'occasion la dernière fois. Certains membres de l'organisation ont souligné que la compagnie, à travers une étude extensive du marché, savait déjà beaucoup sur le comportement des consommateurs sur le marché des voitures neuves. Ils insistèrent que le modèle dynamique intègre ces données pour que le DSC puisse parler d'une seule voix et éviter le besoin de réconcilier des modèles contradictoires.

Pour faire face aux questions relatives à la fidélité à la marque et au comportement des consommateurs l'équipe de modélisation a reparti la base des consommateurs en plusieurs catégories : ceux ayant loué une voiture neuve, acheté une voiture neuve, ou acheté des voitures d'occasion d'âges différents. La Figure 2-2 fait une représentation simplifiée de la matrice transitoire résultante. Chaque entrée dans la matrice représente la probabilité que des acheteurs en provenance d'une catégorie donnée apparaissant sur la ligne changeront de catégorie pour aller dans les catégories apparaissant dans les colonnes à leur prochain échange. La matrice réelle a deux fois autant de catégories qu'elle a de probabilités pour chaque option d'achat pour les véhicules GM et non GM à la fois.

Les probabilités de transition dans la matrice n'étaient pas constantes mais changeaient en fonction des changements des prix des voitures neuves et d'occasion. Des paiements de location réduits sur les véhicules GM augmentent la proportion des consommateurs optant pour une location à GM, alors que des prix de voitures d'occasion plus réduits augmentent la proportion des consommateurs achetant les voitures d'occasion au détriment de nouveaux achats et locations. La réponse à de tels changements est différente pour chaque catégorie de consommateurs.



**Figure 2-2**



La dissolution du modèle ne s'est pas accomplie en une étape mais en plusieurs itérations. A chaque étape les membres de l'équipe de modélisation se sont assurés qu'ils comprenaient la structure et le comportement du modèle et le soumettent aux critiques et commentaires de Zarella et de son équipe. Pour chaque itération ils ont inséré les critiques et recommandations reçues. Même avec la dissolution limitée du modèle les défis liés à la collecte et au traitement des données étaient formidables. Vu le délai de 20 jours, l'équipe a dû utiliser des données déjà disponibles au niveau des différentes sections de l'organisation. Les données de l'étude de marché pour les voitures neuves étaient excellentes. Les données sur la location, un phénomène relativement nouveau, étaient sommaires. Et conformément au modèle mental prévalant qui minimisait l'importance du marché des voitures d'occasion, il n'existait presque pas d'étude décrivant la façon dont les gens échangeaient les nouveaux modèles et les modèles récents de véhicules d'occasion. L'équipe a eu recours aux meilleures sources de données disponibles et a fait usage de son jugement et des données qualitatives chaque fois que les données chiffrées n'étaient pas disponibles.

Au terme des 20 jours l'équipe a encore rencontré Zarella et son équipe. Au lieu de présenter le modèle et les résultats, l'équipe présenta une configuration du modèle en tant que simulateur de gestion vol interactif. Un « tableau de bord » contenait des cadrans et des indicateurs rapportant les informations de comptabilité standards telles que le niveau des stocks, le volume des ventes, les prix, les parts de marché, et la rentabilité. Les acteurs ont fixé des productions cibles, des mesures incitatives, des termes de location, etc.. En appuyant sur une commande sur l'écran les acteurs pouvaient avoir des informations supplémentaires y compris sur la structure et les hypothèses du modèle.

En jouant le jeu au lieu d'écouter un exposé, Zarella et son équipe ont pu explorer par eux-mêmes les dynamiques de la location. Ils pouvaient tenter différentes stratégies, de la subvention agressive des locations au retrait pur et simple du marché de la location, et voir leur impact sur les ventes et les bénéfices à court et long terme. Ils ont pu découvrir qu'il a fallu près de 5 ans pour que l'impact global des décisions de la location apparaisse. Alors que

la location a augmenté les ventes à court terme, il a souvent causé des problèmes quand les voitures de retour de la location ont été remises sur le marché.

Après 20 jours, le processus de modélisation a révélé les défis posés par la location aux compagnies et a fait des recommandations de politique préliminaires. Cependant, avant de créer le moindre consensus en faveur de l'action, il fallait élargir le processus pour y inclure d'autres décideurs importants à travers les Opérations Nord Américaines (NAO).

L'équipe de modélisation entreprit des travaux avec l'Equipe d'Exécution de la Stratégie de Location, un groupe de travail comprenant les gens venant de Marketing, des Finances, et d'autres fonctions. Leur mandat était d'augmenter les parts du marché et la rentabilité. Les membres du groupe ne pensaient pas qu'un modèle était nécessaire, n'avaient pas confiance à l'approche de modélisation, et se sont opposés aux recommandations initiales. Vue sous l'angle de leur modèle mental, une telle prise de position était totalement rationnelle. Le succès de la location et la force du marché des voitures d'occasion prouvaient assez qu'une location compétitif était essentiel à la stratégie de GM.

Souvent, le meilleur moyen d'améliorer sa compréhension des problèmes complexes est de travailler avec ses critiques. Au cours des mois suivants, l'équipe de modélisation a affiné la structure du modèle, amélioré les données et le calibrage, et testé le modèle sur un nombre varié de conditions. Elle rencontrait l'équipe de location à peu près une fois par mois pour présenter les résultats intérimaires et écouter les critiques.

### **2.2.3 Analyse de Politique**

De plus en plus confiant quant à la formulation et au calibrage du modèle, l'équipe s'attaqua à l'analyse de politique. Les leviers de politique comprenaient la périodicité du location et les niveaux de subvention, de même que les mesures d'achat incitatives, les ventes dans les parcs autos, et diverses règles de décision concernant la production. L'impact de chaque combinaison de politiques dépendait des politiques des concurrents et de beaucoup d'incertitudes du marché, des changements au niveau de l'économie, de la démographie, du prix de l'essence, et des taux d'intérêt aux changements au niveau des coûts unitaires de chaque fabricant d'automobiles, de la qualité des voitures, et de la fidélité à la marque.

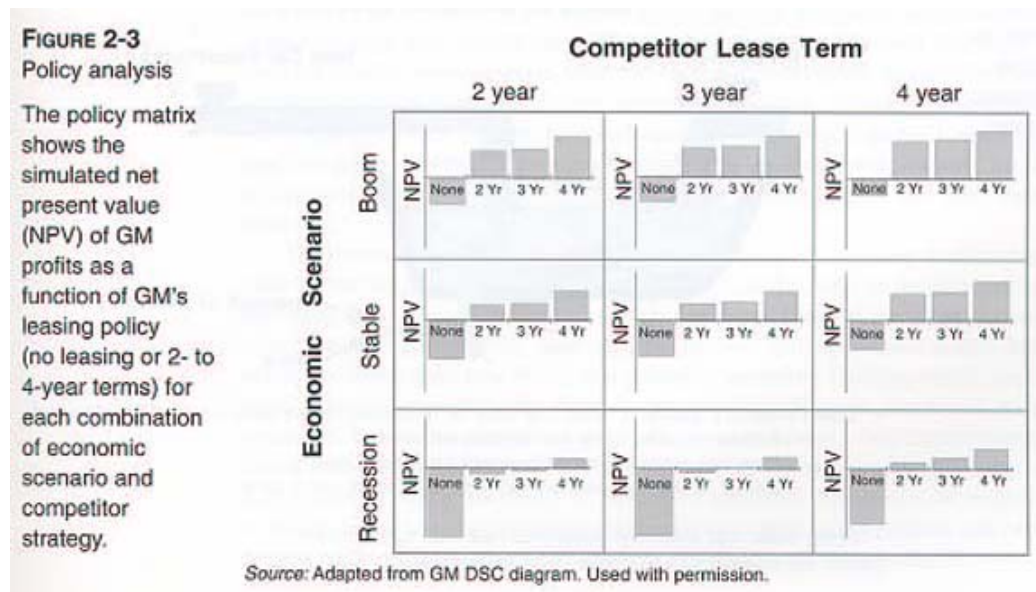
La combinaison des politiques et des scénarios du marché définit une matrice de politique. L'équipe utilisa le modèle pour trouver les politiques de location optimales pour chaque cellule dans la matrice. La Figure 2-3 présente un échantillon illustrant la valeur nette actuelle des bénéfices de GM en fonction de la politique de location (pas de location contre une périodicité de 2-, 3-, 4- ans) pour chaque combinaison de périodicités de location des concurrents et chaque scénario de croissance économique (stable, boom, ou récession).

L'analyse de politique a révélé qu'il n'y avait pas de retour en arrière : les bénéfices sans la location étaient négatifs de façon continue, reflétant l'attraction que la location exerce sur les consommateurs et le dilemme du prisonnier selon lequel arrêter la location de façon unilatérale alors que les concurrents continuaient de l'offrir ce qui réduisait de façon spectaculaire les ventes de GM.

L'analyse a aussi révélé que les bénéfices de GM étaient plus grands de façon régulière avec une période de location de quatre ans. La périodicité de 4 ans battait largement les stratégies et incertitudes par rapport aux actions de la concurrence. Une période plus longue offre deux avantages principaux. En premier lieu, bien qu'une période plus courte réduise le cycle des reprises, la surabondance résultante des voitures presque neuves fait baisser les prix des

voitures d'occasion à tel point que la substitution des voitures d'occasion aux nouveaux achats compense son avantage. En termes de la Figure 2-1, le Marché des Voitures d'Occasion, la Qualité des Voitures d'Occasion, et les boucles de l'Option d'Achat tirent vers le bas le profit des boucles de la Période de la Location et des Mesures Incitatives en faveur de la Location. Une périodicité de quatre ans signifie que les voitures de retour de la location sont des alternatives moins attractives aux voitures neuves, alors qu'elle continue d'accélérer le cycle de reprise d'une certaine façon.

**Figure 2-3**

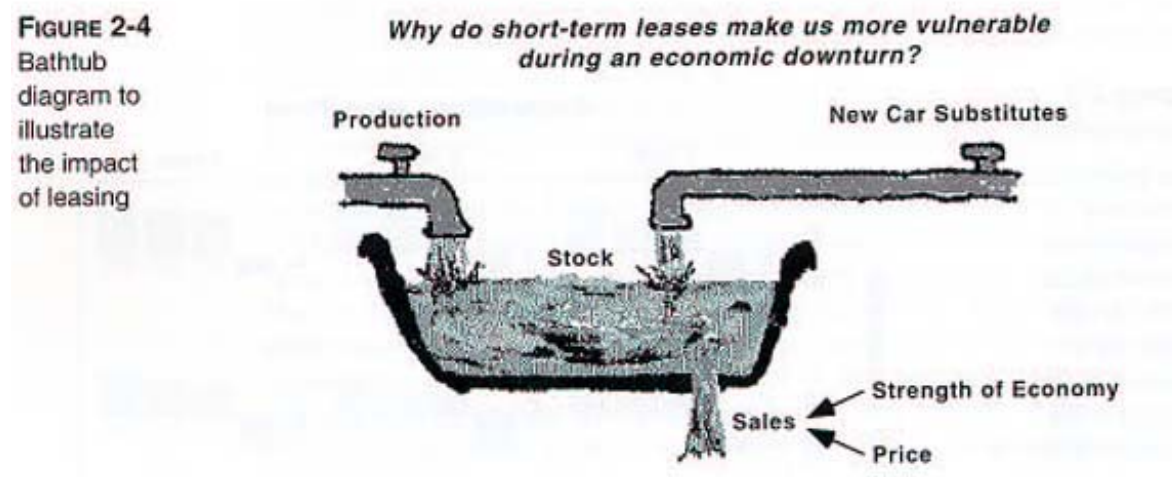


L'autre avantage des périodes de location plus longues est un effet plus subtil de déséquilibre. En augmentant le caractère substitutif entre les voitures neuves et les voitures d'occasion presque neuves, les locations à court terme ont augmenté la vulnérabilité des rentrées d'argent aux récessions dans l'industrie. Plutôt que de montrer des diagrammes complexes comme la Figure 2-1 pour expliquer pourquoi, Pudar élaborait la Figure 2-4, montrant le stock des véhicules de modèle récent sous forme de baignoire. Le diagramme de la baignoire utilise un simple métaphore pour illustrer la dynamique de la location. Le stock des voitures neuves et des substituts aux voitures neuves augmente avec la production et le flux des voitures d'occasion de modèle récent de retour du location (et des parcs des véhicules de location). Les ventes drainent la baignoire.

Pendant les récessions, les ventes de voitures chutent. Le niveau de l'eau dans la baignoire augmente. Les fabricants de voitures se trouvent sous pression pour diminuer les prix et subventionner les locations pour drainer les voitures de la baignoire plus rapidement et réduire la production pour arrêter de nouveaux flux de véhicules. Toutefois, le flux des nouvelles voitures de substitution sur le marché en provenance des locations sur le point d'expirer ne peut être arrêté. En périodes de récession, les locations consentis pendant le boom précédent continuent d'expirer, élevant le niveau de la baignoire. Des prix de voitures d'occasion réduits et les inquiétudes sur les revenus futurs poussent beaucoup de consommateurs à rendre leurs voitures au terme de la location au bailleur plutôt que d'exercer leur option d'achat. Plus la part des voitures neuves à travers le location est élevée, plus le flux imparable des voitures sur le retour est grand. Les prix sont poussés même un peu plus vers le bas, et les réductions de production doivent être même plus grandes, réduisant de façon considérable les bénéfices.

L'équipe a utilisé le diagramme de la baignoire dans les présentations aux hauts cadres de la firme, y compris aux directeurs de toutes les marques. Bien entendu l'analyse formelle, la structure du modèle, et d'autres détails ont été présentés, mais la baignoire a offert un métaphore puissant pour communiquer un important aperçu de la dynamique et a aidé dans le difficile processus de changement des modèles mentaux.

**Figure 2-4**



Pudar et son équipe ont fait deux recommandations principales à Zarella et aux autres hauts responsables de NAO. D'abord, GM devait changer les mesures incitatives en vue de favoriser les locations à plus long terme et modifier le mélange du portefeuille des locations pour aller vers une périodicité moyenne plus grande. Ensuite, ils ont recommandé que toutes les propositions de fixation de prix nouvelles et les programmes de marketing incluent de façon formelle l'analyse de leur impact sur le marché des voitures d'occasion et ses réactions face au marché des voitures neuves. Ils ont recommandé que l'organisation chargée de l'étude du marché crée de nouvelles cliniques pour évaluer le comportement choisi des consommateurs de voitures neuves, d'occasion et par location afin que des données à jour soient disponibles sur une base continue. Ils ont aussi soutenu le changement des mesures incitatives et des métriques pour les responsables des groupes de voitures pour y inclure les pertes ou profits réalisés par GMAC en conséquence de la politique de location.

Beaucoup de responsables de marque et d'analystes de marques se sont initialement opposés à ces recommandations. Leur argument était que les consommateurs avaient été conditionnés pour préférer les locations à court terme. La concurrence était intense et la part de marché de GM était en baisse. Ford, en particulier, était lancé dans une politique agressive en faveur des locations de 2 ans avec des subventions significatives ; à moins d'une réaction de même nature de GM, ils soutenaient, les parts du marché se réduiront davantage. Etant donné la pression énorme qu'ils subissaient pour demeurer compétitifs, ils n'étaient pas prêts à sacrifier des parts de marché et de bénéfices aujourd'hui pour éviter la possibilité des problèmes pouvant être entraînés par la location dans quelques années. Les responsables de marque et les organisations de vente mirent une pression énorme sur la direction générale de NAO pour qu'elle augmente les niveaux résiduels. Ils ont fait allusion à la forte demande de voitures d'occasion et aux prix en hausse des voitures d'occasion pour justifier une augmentation des résiduels. Ils soutinrent aussi que les niveaux de subvention devaient même être augmentés d'avantage au dessus des résiduels élevés qu'ils recommandaient. Enfin, ils demandèrent une diminution de la fraction des véhicules venant du location que GM prévoyait devoir prendre à la fin de la location. Le coût des subventions est défermée parce qu'il se réalise au retour des

voitures du location. Les règles de comptabilité obligent les fabricants de voitures à mettre de côté des réserves pour couvrir le coût des subventions escompté ; ces réserves diminuent les revenus de la période courante. Le montant mis de côté dans les réserves dépend de la fraction des voitures dont le retour est escompté. Si les consommateurs exercent leur option d'achat à l'expiration de leur location, alors GMAC n'aura plus à payer la différence entre les résiduels subventionnés et la valeur marchande. Beaucoup de responsables de marque croyaient qu'un marché des voitures d'occasion fort signifiait que les réserves étaient trop élevées et pouvaient être réduites sans problème, permettant aux divisions des voitures de poster des bénéfices courants plus élevés en même temps qu'elles augmentaient la part du marché. Ils ont appuyé leur position avec des tableaux sur lesquels on supposait que les tendances récentes en faveur des prix de voitures d'occasion plus élevés et d'une plus grande rétention par les consommateurs des voitures de retour de la location allaient continuer, c'est à dire, des tableaux sur lesquels toutes réactions entre le marché des voitures neuves et celui des voitures d'occasion étaient supprimées.

Le modèle dynamique, par contre, indiquait que les prix des voitures d'occasion allaient bientôt baisser au retour sur le marché du volume élevé des véhicules en location et des parcs autos vendus au cours des années passées. L'analyse de l'équipe indiquait qu'une partie des hausses du prix des voitures d'occasion était un écart momentané généré par les grands parcs automobiles à un moment où ils achetaient beaucoup pour ravitailler leurs parcs. A la fin de cette période de constitution de stocks, les ventes de voitures d'occasion allaient s'effondrer alors que le flux des voitures de retour de la location allait se poursuivre. Au moment où les prix des véhicules d'occasion chutaient en dessous des résiduels négociés, un grand nombre de consommateurs résilieront leur location plus tôt et un nombre moins élevé voudra exercer son option d'achat, réduisant la fraction de rétention et stimulant encore plus la livraison des voitures d'occasion de modèle récent. GM se trouvera dans l'obligation de prélever des frais considérables sur les rentrées d'argent pour la réconciliation résiduelle, et les nouvelles ventes de voitures en pâtiront étant donné que les consommateurs allaient opter pour des véhicules de retour de location de modèle récent.

Les cadres de la direction générale de NAO décidèrent de se focaliser sur une périodicité de 36-à 48- mois et d'éliminer les locations de 2 ans. Ils choisirent aussi de ne pas augmenter les valeurs résiduelles et entreprirent une accumulation complète du risque résiduel en calculant les réserves. Ces décisions ont rendu la subvention beaucoup plus coûteuse pour les responsables de marque et augmenté les paiements de la location.

#### **2.2.4 Impact et Suivi**

En 1997, un flux de véhicules de retour de la location inonda le marché. Le prix des voitures d'occasion chuta considérablement (Figure 2-5). Les données montrent le total des voitures d'occasion ; la chute des véhicules de modèle récent était plus abrupte et était le plus sévère dans les segments où la location avait augmenté le plus rapidement.

Alors que les prix chutaient, moins de consommateurs optèrent pour garder leurs voitures. L'Association des Opérations Bancaires des Consommateurs rapporta que la fraction des véhicules de retour de la location à terme intégral rendus aux bailleurs a connu un bond de 29% en 1997 à 39% en 1998. Près des  $\frac{3}{4}$  des véhicules rendus aux bailleurs après location ont subi des pertes ; la perte moyenne en 1998 était de 1878 \$ par véhicule, 220% de plus que la moyenne pour 1993.

Les actions prises par GM plus tôt lui ont permis d'éviter ces pertes, alors que les autres fabricants d'autos se sont trouvés en face d'énormes frais de réconciliation. Les profits à Ford



Credit Corporation ont chuté de 410 million \$ en 1997 comparativement à 1996, une chute de 28%, due en grande partie aux pertes sur les véhicules de retour du location. A GMAC, le revenu net des opérations de financement automobiles chutèrent de 36 million\$ seulement, moins de 4%, et les profits d'ensemble de GMAC augmentèrent de plus de 6%.

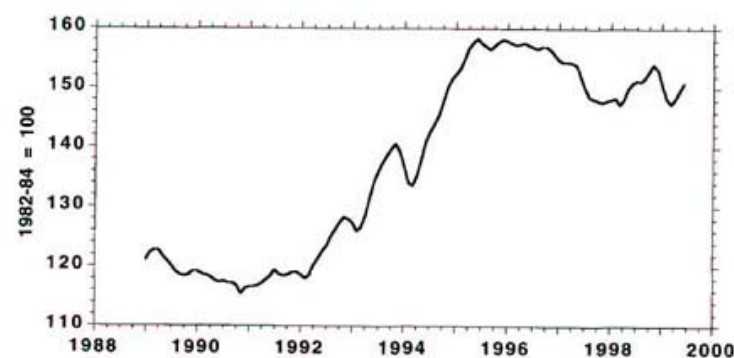
En 1997 plusieurs fabricants d'automobiles, y compris Ford et Nissan EU, tentèrent d'appuyer les prix de vente en gros pour leurs voitures en payant les concessionnaires pour qu'ils gardent les voitures de retour du location au lieu de les rendre au fabricant pour leurs ventes aux enchères. Ford paya aux concessionnaires 700 à 6000\$ (selon le modèle) pour chaque véhicule de 2 ans de retour de la location que le concessionnaire accepte de garder, puisant dans ses réserves résiduelles pour la première pour le faire. Cette politique contribua à réduire le nombre des voitures de 2 ans d'âge vendues aux enchères, mais bien sûr, puisque la rétention de ces véhicules augmenta le stock des concessionnaires, le nombre de ces véhicules payés par les concessionnaires aux enchères chuta d'un nombre égal, ainsi les prix de vente en gros continuèrent à chuter.

**Figure 2-5**

**FIGURE 2-5**

Used car prices,  
1989-1999

Index shows the  
used car and truck  
component of the  
US Consumer  
Price Index,  
seasonally  
adjusted.



Source: US Bureau of Labor Statistics, series CUSR000SETA02.

En 1998 GE Capital a mis fin à son partenariat de financement des locations avec Chrysler parce que, comme le rapportait Automotive News (24 Août, p.1),

Les Services Financiers de GE Capital se sont brûlés le doigt sur les pertes de valeur résiduelle en 1997. Cela était dû en grande partie aux produits de retour du location de Chrysler... GE Capital a cité les pertes résiduelles comme l'une des raisons de la chute des profits opérationnels pour les Services Clients, la cellule de GE qui comprend Auto Financial Services. Les bénéfices ont chuté de 1,3 milliards en 1996 à 563 millions [en 1997].

En 1998 le revenu net à Ford Credit a augmenté de 53 millions \$ sur le niveau en baisse de 1997 mais est demeuré 25% au dessus du revenu net pour 1996. 4. Le financement auto net de GMAC a augmenté de 74 million \$ par rapport à 1997, une augmentation de 4% par rapport à 1996, et le profit global de GMAC pour l'année 1998 augmenta de 181 million \$ par rapport à 1996, un gain de 15%. En 1998 Ford et les autres fabricants d'automobiles se lancèrent en retard sur les traces de GM et commencèrent à s'éloigner de la location à court terme.

Depuis 1996 le modèle de la location a été actualisé plusieurs fois, éclaté d'avantage pour séparer le segment des voitures et celui des camions légers, et utilisé pour examiner les problèmes tels que les ventes des parcs autos. Le modèle est maintenant utilisé sur une base courante par l'Equipe de Fixation des Prix du Portefeuille de NAO, le groupe chargé

d'examiner et d'approuver tous les programmes de fixation des prix et des mesures incitatives en Amérique du Nord.

4 Exclure le revenu des ventes d'avoir.

Pudar, Directeur actuel du DSC (rebaptisé le Centre d'Appui Stratégique [SSCI]), rapporte que le SSC continue d'appliquer la dynamique des systèmes, en combinaison avec d'autres méthodes analytiques, à un nombre élargi des problèmes, des négociations de joint venture avec des gouvernements étrangers à la conception des plans d'affaire pour les nouveaux produits, services et unités d'affaires.

## **2.3 A Temps Et Dans Les Limites Du Budget : La Dynamique De La Gestion De Projet 5**

5 Cette section est basée sur Cooper (1980) et des communications personnelles avec Ken Cooper (Président, Pugh—Associés de Roberts), Rich Goldbach (ancien employé de Ingalls/Litton Industries et actuel président de Metro Machine Corporation) et beaucoup d'autres Associés de Pugh—Roberts. Je leur suis reconnaissant pour leur aide.

En 1970, Ingalls Shipbuilding de Pascagoula, Mississippi, a décroché un contrat important en vue de construire une flotte de 30 nouveaux destroyers pour la Marine Américaine. Avec son contrat de 1969 pour 9 LHAs (un porte avion/d'attaque amphibie), Ingalls s'est retrouvé dans la position enviable d'avoir décroché deux des plus grands programmes de construction de bateau dans le monde et anticipaient des ventes et des bénéfices solides pour les années à venir. Toutefois, vers le milieu des années 70, Ingalls s'est retrouvé en face d'énormes difficultés, confrontés à des surcoûts de plus de 500 million \$. Avec des ventes annuelles au milieu des années 70 de 500 à 800 million \$, le dépassement menaçait de mener Ingalls et sa société mère Litton Industries à la faillite. Corrigé à l'inflation le dépassement serait supérieur à 1,5milliard \$ en 1999.

Les deux contrats avaient été attribués comme des projets d'acquisition en bloc avec une structure de contrat à durée déterminée dans lequel Ingalls a « reçu seulement les spécifications d'exécution, et était par là-même seule responsable de toutes conceptions de système, toutes conceptions détaillées, acquisitions d'équipements, planifications, expérimentations, et constructions » (Cooper 1980, p.22).

Les deux programmes comportaient de nouvelles conceptions novatrices et techniquement sophistiquées. Les destroyers (appareils de combat) à tâches multiples de classe D étaient deux fois plus grands que les « boîtes en étain » d'avant. Le LHA était aussi un concept totalement nouveau. D'une hauteur de plus de 20 étages et de la longueur de trois terrains de football, chaque LHA transporte un total de 2000 Marines prêts pour le combat et 200 véhicules de combat pouvant être déployés en faisant atterrir des avions et plusieurs douzaines d'hélicoptères. Les contrats pour le DD et le LHA nécessitaient une mobilisation massive des ressources de Ingalls. Déjà un des plus grands chantiers de construction navale du monde, Ingalls doubla sa main d'œuvre à plus de 20.000. A l'époque, il y avait une pénurie de certaines professions qualifiées et de certains équipements critiques. Ingalls a dû créer aussi de nouvelles structures organisationnelles pour gérer les deux programmes.

Les projets de grande envergure sont parmi les entreprises les plus importantes et les plus constamment mal gérées dans le monde moderne. Ces projets comprennent la conception et la construction des œuvres et infrastructures civiles (ex : les ponts, tunnels, usines d'électricité, et les réseaux de télécommunication), des systèmes militaires (ex : les avions, navires, et les systèmes d'armement), et des nouveaux produits au niveau de chaque industrie (ex : les logiciels, automobiles, la conception des semi-conducteurs de puce, et la construction de sensass d'eau).



Les projets de toutes sortes connaissent des dépassements de coûts, des retards, et des problèmes de qualité habituellement. Cooper et Mullen (1993) ont étudié un échantillon de grands projets civils et militaires (avec une moyenne de 130.000 personnes-heures de travaux prévus sur près d'un an pour les projets civils et 170.000 personnes-heures de travaux prévus sur plus de 2 ans pour les projets militaires). Ils ont découvert que les projets commerciaux ont coûté 140% et nécessité 190% plus de temps que ce qui avait été prévu au départ, alors que les projets militaires ont coûté 310% de plus que les estimations de départ et nécessité 460% plus de temps pour être achevés.

Les retards, les surcoûts, et les problèmes de qualité dans le développement de nouveaux produits commerciaux peuvent tuer une compagnie, particulièrement dans des industries hautement volatiles telles que le logiciel et la haute technologie. Les surcoûts et les retards dans la réalisation des travaux civils et des projets militaires peuvent affecter la viabilité économique d'une région et la capacité d'une nation à se défendre.

### **2.3.1 La réclamation**

La Marine militaire et Ingalls se sont trouvés en désaccord total sur les causes des retards et des surcoûts. Ingalls était convaincu que la majeure partie des surcoûts était due aux actions de la Marine militaire. Comme de coutume, les grands projets, les technologies et systèmes devant être utilisés sur les navires du DD et du LHA n'étaient pas prêts au moment de l'attribution des contrats. Les technologies de navigation, d'information, de communication et les systèmes d'armements, par exemple, se développaient rapidement, et la Marine militaire a naturellement tenté d'intégrer les systèmes les plus avancés au navire. Rich Goldbach, un des hauts cadres de Ingalls à l'époque et un des principaux auteurs de l'action en justice, a expliqué que « Ingalls était convaincu que le gouvernement avait entravé la conception du LHA dès le départ en faisant une micro-gestion du processus de conception ». Au moment où ils procédaient à la conception au niveau le plus élevé, la conception détaillée et même la construction, Ingalls a reçu des milliers de modifications du concept de la part de la Marine. Ingalls croyait que la plupart des dépassements étaient dus à l'imposition de ces changements de conception. Après le refus répété de la Marine de le dédommager pour ces coûts, Ingalls a déposé une réclamation contre son client en vue de se faire dédommager pour 500 million \$ de pertes attendues.

Poursuivre un client en justice est toujours compliqué. Dans le cas de Ingalls c'était particulièrement délicat. Ingalls a commencé l'action en justice tôt, alors qu'il restait encore beaucoup d'années avant la fin des deux programmes. Ingalls a dû continuer à gérer les deux programmes et à maintenir de bonnes relations de travail avec la Marine alors qu'il était engagée dans une action en justice contre elle. En plus, à une époque où la construction de navires commerciaux était en déclin aux Etats Unis, la Marine était le client le plus important de Ingalls et le serait pour un temps indéterminé.<sup>6</sup>

La Marine a reconnu avoir produit les changements de conception mais soutint que leur impact était limité au coût direct de reproduction des spécifications et des ré-conceptions des schémas d'ingénierie concernés. Le coût total de ces impacts directs constituait une petite fraction du total du remboursement demandé. Ingalls répliqua qu'un changement de conception peut susciter des coûts beaucoup plus élevés, par exemple, en changeant la séquence des travaux et en imposant des heures supplémentaires et des recrutements imprévus qui ont perturbé les autres phases du travail, dilué les expériences, et réduit la productivité même dans les phases qui n'étaient pas directement concernées par les ordres de changement. Ingalls croyait que de tels effets en cascade sont de nature à multiplier l'impact direct d'un

avis de changement plusieurs fois, entraînant des « retards et interruptions » d'ordre général considérables.

La Marine répliqua que les soit disant délais et interruptions étaient en fait le résultat de la mauvaise gestion ou de la soumission délibérée d'une offre moins élevée par Ingalls pour décrocher le marché. Le désaccord sur la composante retard et interruption des poursuites passées à travers l'industrie militaire perdurait souvent pendant des années. La Marine n'a jamais payé de frais liés à une poursuite importante pour retard et interruption.

### **2.3.2 Elaboration du Modèle Initial**

Ingalls a poursuivi son action en justice pendant des années, mais les outils traditionnels de gestion de projet n'offraient pas de moyens de quantification des effets en cascade. Ingalls s'est rabattu sur la dynamique des systèmes en vue de quantifier les retards et interruptions causés par les changements de concept de la Marine. Le modèle, élaboré par Pugh –Roberts et Associés de Cambridge, Massachusetts, a simulé toutes les phases des projets DD et LHA, de l'attribution du marché à la livraison du dernier navire, prévue à l'époque cinq ans plus tard.<sup>6</sup>

Le modèle définitif contenait plusieurs milliers d'équations, un très large modèle en fin de compte (surtout si l'on considère l'état de la technologie informatique à l'époque). Cependant, il a commencé comme un modèle beaucoup plus petit conçu pour illuminer les réactions basiques pouvant être responsables des effets en cascade. L'équipe de modélisation a travaillé étroitement avec l'organisation chargée de la gestion de l'action en justice de Ingalls, y compris les responsables de toutes les phases principales de chaque programme et des principaux avocats. Le modélisateur principal Ken Cooper a décrit le processus ainsi (1980, pp. 26-27) :

L'équipe de projet de Ingalls a instruit et examiné la décision des éléments à inclure dans le modèle, et des mesures et détails avec lesquels inclure ces éléments...[Plusieurs douzaines de personnes à toutes les étapes de la construction du navire, des travailleurs au Vice Président, ont été interviewées. Ces personnes ont fait des observations quantitatives et qualitatives sur la conception et la construction des navires. Au moment où le modèle commençait à prendre forme, les demandes de données chiffrées ont été clarifiées ; un effort gigantesque de collecte de données, de concert avec d'autres éléments de la poursuite, a été engagé. Ces données et informations ont fourni assez de matière pour assembler un modèle mathématique préliminaire d'une phase unique de travail. Les équations, paramètres et sorties détaillées ont été examinées par l'équipe du projet, et plusieurs modifications du modèle ont été effectuées.

<sup>6</sup> A cause partiellement des problèmes rencontrés dans l'exécution du programme, le nombre de LHA finalement construits a été réduit à 5. LHA5, l'USS Peleliu, a été achevé au milieu des années 80, comme l'a été le dernier destroyer de classe DD, l'USS Fletcher.

### 2.3.3 Hypothèse Dynamique

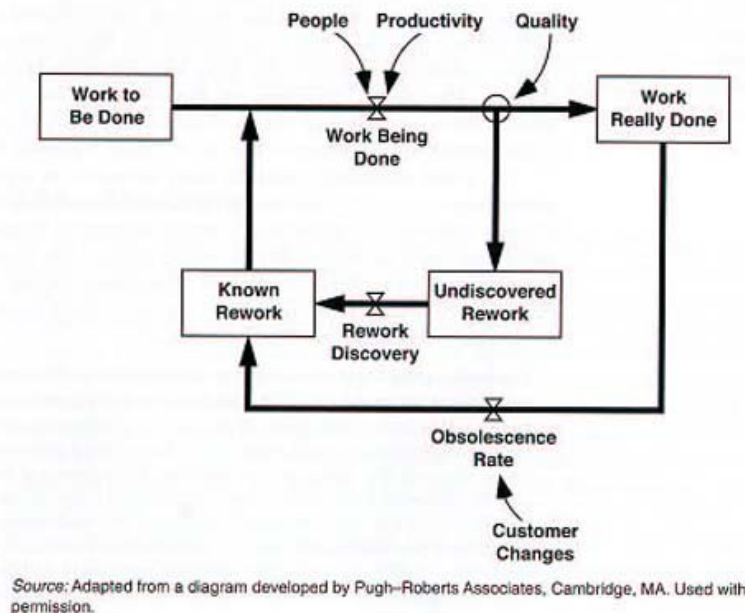
Une description complète de la structure de réaction du modèle se situe en dehors de cette discussion ; cette section offre seulement quelques illustrations du type d'effets en cascade abordé par le modèle.

La Figure 2-6 montre une structure très simplifiée des stocks et des flux du travail dans une seule phase de projet. Les tâches peuvent être des tâches de conception de systèmes au niveau le plus élevé, de préparation de schémas d'ingénierie détaillés, ou de construction de navires. Les rectangles et les vannes représentent la structure des stocks et des flux du système. Les stocks représentent les accumulations de travaux dans les différentes catégories ; les vannes représentent le flux des tâches à travers le système. Initialement toutes les tâches sont dans le stock des Travaux à réaliser. Achever une tâche nécessite des ressources comme une main d'œuvre productive avec les qualifications appropriées ; le nombre et la productivité de la main d'œuvre varient au fil du temps parallèlement au changement des conditions du projet. Les tâches peuvent être exécutées correctement ou incorrectement, selon la qualité du travail. Les tâches exécutées correctement augmentent le stock des Travaux Réellement Exécutés alors que les tâches contenant différents types d'erreurs augmentent le stock des Travaux à faire Non Découverts. La qualité du travail est souvent assez nulle, d'autant que le développement de nouveaux produits et des projets de grande envergure généralement implique de nouvelles technologies, de nouveaux équipements, et des systèmes et implique souvent des circonstances nouvelles uniques. Cooper et Mullen (1993) ont trouvé que la portion moyenne des travaux effectués correctement la première fois dans leur échantillon était de 68% pour les projets commerciaux et de 34% seulement pour les projets de la défense.

**Figure 2-6**

**FIGURE 2-6**  
Stock and flow structure of a project phase

Rectangles represent the stock of tasks, straight lines and valves represent flows of tasks between categories (chapter 6). Quality is the fraction of tasks done correctly. The diagram is highly simplified and omits several task categories and flows included in the full model.



La découverte des erreurs prend du temps et nécessite des moyens. Souvent, les erreurs sont seulement détectées à une phase en aval, comme quand une erreur de conception est découverte durant la phase de construction. Les tâches dans le stock des travaux à faire non découverts sont par conséquent perçues comme étant achevées et sont traitées comme si elles

avaient été effectuées par l'organisation. La découverte des erreurs par une assurance de qualité, l'expérimentation, ou une phase en aval transfère la tâche effectuée de façon incorrecte au stock des Travaux à Faire Connus. Cooper et Mullen (1993) ont trouvé des retards moyens dans la découverte des travaux à refaire de près de 9 mois pour les projets civils et militaires, une fraction significative de la durée prévue des projets.

Les changements au niveau des spécifications élaborées par le client ont des effets similaires à la découverte des erreurs. Les changements de spécifications rendent certains travaux préalablement faits correctement dépassés, transférant ces tâches du stock des Travaux Réellement Exécutés au stock des Travaux à Refaire Connus. La phase concernée doit se rappeler des travaux qu'elle a préalablement transférés à d'autres phases et sur lesquels ces phases en aval ont basés leurs propres travaux. L'organisation doit alors augmenter les ressources et l'attention consacrées au travail à refaire, ralentissant l'achèvement de travaux de base restants et perturbant potentiellement le projet dans son ensemble 8.

De toute évidence, les modifications du client rendant les travaux de conception achevés, dépassés sont coûteuses parce que les tâches concernées doivent être retravaillées ; il s'agit là des impacts directs des modifications que la Marine était disposée à payer. Mais les effets indirects peuvent être plusieurs fois plus importants. La Figure 2-7 montre quelques réactions expliquant la façon dont les effets directs des modifications du client peuvent être amplifiées.

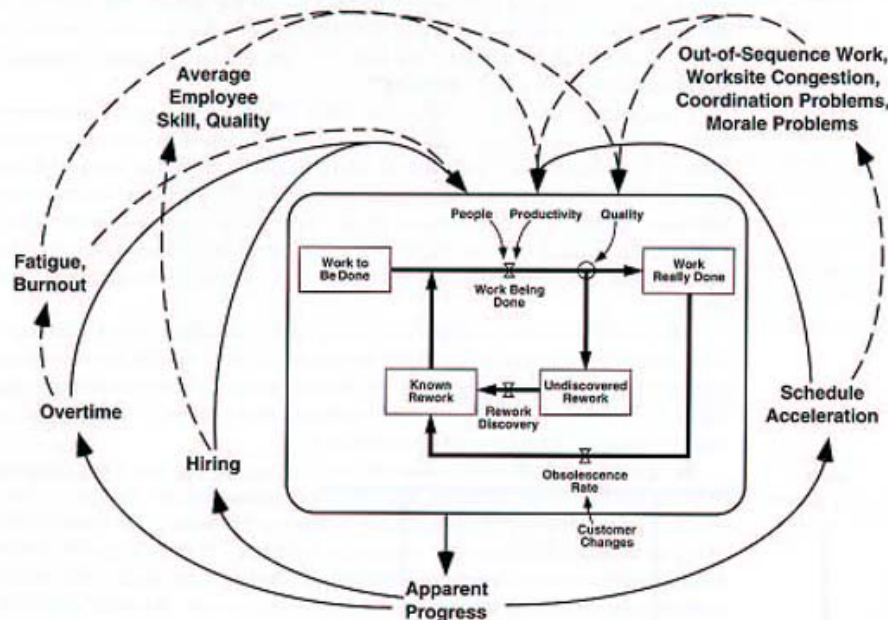
Quand un projet prend du retard l'entrepreneur a des choix limités. Il peut mettre sa main d'œuvre sur heures supplémentaires, augmentant ainsi de façon effective le nombre des employés travaillant sur le projet. Cette réaction négative ou équilibrée est l'effet recherché par les heures supplémentaires et apparaît sur le diagramme en lignes solides. Toutefois, des heures supplémentaires excessives ou prolongées provoquent la fatigue et l'épuisement. La productivité et la qualité baissent, réduisant le progrès et augmentant le stock du travail à refaire non découvert. L'épuisement conduit aussi à l'absentéisme et l'attrition d'autant que les employés demandent à être transférés ou à partir, réduisant le nombre des gens sur le projet. Ces effets non voulus, apparaissant sous forme de lignes à tiret, forment des réactions positives (se renforçant mutuellement) qui agissent comme des cercles vicieux pour réduire l'effet progressif des heures supplémentaires. Pour éviter les effets secondaires des heures supplémentaires il est possible de recruter un plus grand nombre de personnes (une autre boucle d'équilibrage). Mais un recrutement rapide réduit la base d'expérience des employés. Si le pool des travailleurs qualifiés dans la région est réduit relativement aux besoins de recrutement, un recrutement accéléré diminue la qualité moyenne des candidats disponibles. Les normes de recrutement s'érodent souvent en vue de pourvoir les postes vacants rapidement. Tous ces effets réduisent la productivité et la qualité et ralentissent le progrès au moment même où la direction cherche à augmenter le nombre de têtes et à accélérer le progrès.

-----  
8 La plupart des grands projets militaires et civiles ont des délais de livraison spécifiés. Ne pas respecter les délais entraînent des sanctions, connues sous le nom de dommages liquidés (LDs), pour chaque jour de retard du projet ; les LDs peuvent rapidement atteindre des millions. Dans les disputes du genre décrit dans ce document, les LD forment la base principale des contre poursuites du client contre l'entreprise. Dans plusieurs cas où les modèles de la dynamique des systèmes ont été utilisés la différence entre les poursuites pour les retards et interruptions de l'entreprise et la contre poursuite du client s'élevait à plusieurs milliards de dollars. Même quand les LDs ne s'appliquent pas, comme c'est le cas avec les projets de développement de produits commerciaux domestiques, chaque jour de retard du projet grignote sur la compétitivité du produit et les ventes et bénéfices qu'il peut engendrer.

### Figure 2-7

**FIGURE 2-7** Side effects of corrective measures lead to vicious cycles

As customer changes cause a project to fall behind, management can accelerate the schedule, use overtime, and hire more people, forming negative feedbacks designed to get the project back on track (solid lines). However, each of these negative loops triggers side effects that undercut the intended effects, forming vicious cycles (positive feedbacks, shown by the dashed lines).



Source: Adapted from a diagram developed by Pugh-Roberts Associates, Cambridge, MA. Used with permission.

Quand un projet prend du retard la direction met souvent la pression sur les employés pour qu'ils travaillent plus durement et comprime le calendrier en chevauchant les activités devant être faites en séquences. La productivité augmente apparemment, mais il y a aussi des effets secondaires non prévus. Les compressions de calendrier poussent les gens à travailler hors séquence, ce qui veut dire que des informations ou équipements importants provenant des phases en amont ne sont pas disponibles. Un concept détaillé peut commencer avant que le concept du système ne soit prêt et stable. Les constructions de prototypes peuvent commencer avant la finition des spécifications de la composante.<sup>9</sup> La compression du calendrier entraîne aussi la congestion du chantier, que ce soit les installations CAD/CAM surchargées dans l'ingénierie ou un chantier sur lequel travaillent trop de personnes. Les responsables et les superviseurs trouvent que leur temps est de plus en plus pris par les réunions en vue de résoudre les conflits issues de l'accélération du calendrier et d'une coordination ad hoc, de dernière minute des activités hors séquence. Le stress causé par la pression du travail, a augmenté les interventions de sapeurs pompiers et des changements de calendrier constants peuvent entraîner des problèmes de moralité qui réduisent la productivité et la qualité et augment l'absentéisme et l'attrition. Ces effets sont multipliés d'avantage par le cycle de travail à refaire. Une qualité réduite signifie qu'il y a des erreurs au niveau d'un nombre plus élevé de tâches. Parce qu'on ne découvre pas immédiatement beaucoup d'erreurs, les travaux subséquents commencent à utiliser des concepts, équipements, et informations qui semblent corrects sur le coup mais que l'on rappelle plus tard pour être retravaillés.

Beaucoup d'organisations ont adopté aujourd'hui les pratiques d'ingénierie concourantes conçues pour réduire la durée du cycle de développement. Il est difficile de déployer avec succès une ingénierie concourante et même dans des programmes très concourants le degré de chevauchement entre les différentes phases peut être excessivement agressif, entraînant un

excès de travaux à refaire. Voir Ford et Sternam (1998a) et (1998b) pour des modèles d'ingénierie concourante de la dynamique des systèmes, avec des applications à la conception des semi-conducteurs. Voir aussi la section 14.5.

Ainsi, les modifications du client peuvent interrompre et mettre en retard des activités en amont telles que la conception du système. Ces phases doivent alors rappeler certains travaux préalablement livrés, en sorte que les retards et les problèmes de qualité s'accumulent au niveau des phases en aval comme la phase où le concept est détaillé, d'acquisition des équipements et de construction. Les phases en aval doivent ensuite reprendre la plupart de leurs travaux, souvent à des coûts élevés (en particulier quand la construction a commencé). Dans la mesure où des projets différents tels que les programmes DD et LHA partagent les mêmes ressources comme les chantiers, les employés, l'infrastructure d'appui, et la direction, les problèmes au niveau de l'un peuvent se répercuter sur l'autre.

Les diagrammes ci-dessus sont très simplifiés, et beaucoup d'autres réactions captées sur le modèle complet sont omises (combien d'autres effets de ce genre pouvez-vous identifier à travers votre propre expérience ?). Mais les diagrammes illustrent la façon dont des changements apparemment petits dans les spécifications du client peuvent provoquer des retards et interruptions beaucoup plus importants malgré tous les efforts de la direction pour remettre le projet sur les rails. Le modèle a augmenté l'analyse de projet traditionnelle à travers la reconnaissance explicite du cycle de travaux à refaire, de productivité et de qualité du personnel variable, et la plaie de la plupart des projets de développement –le travail à refaire non découvert. De façon conventionnelle, tous effets indirects étaient perçus comme une petit pourcentage additionnel sur les coûts directs. La reconnaissance explicite de la structure de réaction décrite ici a aidé à expliquer la façon dont les effets indirects des modifications du client peuvent être plusieurs fois plus grands que les effets directs.

### **2.3.4 Le Processus de Modélisation**

L'équipe de modélisation a assemblé le modèle complet en dupliquant le module générique de la phase de projet en vue de représenter chaque phase pour chaque navire dans chaque programme. Les activités principales (la conception du système, le concept détaillé, l'acquisition, la construction, etc.) ont été éclatées d'avantage chaque fois que cela était nécessaire ; par exemple, la construction a été divisée en plusieurs activités majeures (ex : la coque, la canalisation, l'électricité, etc.) et la main d'œuvre chargée de la construction a été répartie entre les principaux corps de métier (ex : les ouvriers de la sidérurgie, les électriciens, etc.). Les progrès dans la construction de chaque navire ont été représentés séparément. Chaque exemple du module de la phase générique a été calibré à l'activité spécifique qu'il représentait. Les activités individuelles, les phases et programmes ont été reliés par une structure additionnelle représentant la direction générale du programme, le suivi des progrès, l'élaboration du calendrier, le recrutement, l'allocation de ressources, etc.

Un modèle de cette envergure n'aurait jamais pu être construit, calibré, maintenu, ou compris si une telle architecture modulaire n'avait pas été utilisée. Pour représenter un rayon d'activités aussi varié le module générique se devait d'être extrêmement robuste. Un effort considérable a été déployé dans des tests dans des conditions extrêmes pour assurer que le modèle agit de façon appropriée sous toutes combinaisons imaginables d'entrées et de conditions (voir le chapitre 21). L'équipe a travaillé pour assurer que le modèle était consistant au regard des informations disponibles, y compris les évaluations qualitatives tirées des interviews et observations sur le terrain, pas seulement les données chiffrées.

Au début, l'équipe a comparé le produit du modèle à l'histoire du projet à ce jour. Le but de la comparaison au comportement historique n'était pas de prouver à Ingalls que le modèle était bon, mais plutôt d'identifier les points sur lesquels le modèle devait être amélioré. Ces comparaisons ont parfois identifié des omissions et des problèmes, entraînant des révisions par rapport à la structure et aux paramètres du modèle. Dans d'autres cas, les incohérences entre le modèle et les données suggéraient que les données n'étaient pas consistantes ou complètes, entraînant des collectes de données, interviews, affinements des valeurs et justification des paramètres supplémentaires. Ce processus a entraîné trois itérations majeures et beaucoup d'itérations mineures du modèle.

Le modèle a finalement dupliqué assez bien la performance historique des projets. Mais, comme expliqué dans le chapitre 2-1, il est assez facile de faire correspondre un modèle à un ensemble de données. Il est aussi nécessaire que le modèle reproduise les données pour de bons motifs, motifs que les modélisateurs et la direction de Ingalls comprennent et peuvent expliquer dans un langage clair. Alors que ces motifs sont particulièrement importants dans un environnement hostile de poursuite judiciaire, ils sont importants dans tous projets de modélisation. En définitive les clients de tous projets de modélisation entreprendront des actions seulement dans la mesure où leurs modèles mentaux auront changé. A leur tour, les modèles mentaux du client sont susceptibles de changement seulement si le client a confiance à l'intégrité et au caractère approprié du modèle formel. Développer cette confiance nécessite un processus de modélisation qui offre au client l'opportunité d'explorer aussi profondément qu'il le veut les détails, de remettre en cause toutes les théories, et tous les résultats. Ouvrir le modèle à l'examen du client est aussi essentiel afin que le modélisateur s'assure qu'il aborde les problèmes qui comptent le plus aux yeux du client et qu'il produit le meilleur modèle à cette fin.

Pour découvrir les imperfections d'un modèle et créer des opportunités permettant à l'équipe d'Ingalls de remettre en question le modèle l'équipe de modélisation a utilisé d'autres procédures. Cooper (1980, p.27) explique :

D'abord, nous avons établi d'emblée des limites explicites de raisonnable pour chaque paramètre numérique sur le modèle ; ces limites n'auraient pu être violées pour réaliser une simulation plus « correcte ». En plus, les paramètres numériques dans les différentes sections du modèle devaient être consistants entre eux en termes de magnitude relative. Ces instructions ont toujours été respectées. Le modèle a aussi été soumis à une série de « tests chocs » pour évaluer sa solidité en répondant comme l'aurait fait la compagnie à des circonstances radicalement différentes. Enfin, plusieurs combinaisons plausibles différentes des équations et des paramètres ont été testées en vue d'explorer des « modèles alternatifs » qui pouvaient correctement représenter les opérations de Ingalls.

Au fil du temps, les projections générées par le modèle pour le calendrier et les coûts se sont révélés assez proches de ce qui s'est réellement passé, augmentant encore plus la confiance à la capacité du modèle à capter les structures sous-jacentes des projets.

L'équipe de modélisation a évalué les effets à travers tout le système des changements de concept de la Marine en comparant deux simulations. L'exemple « tel que construit » était la simulation historique comprenant tous les changements de concept de la Marine ; cet exemple a été comparé à l'exemple « aurait été » duquel les changements de concept ont été retirés. La différence en terme de coûts de locations et de dates d'achèvement représentait l'impact cumulé des changements de concept. Les analyses de sensibilité ont ensuite placé des entraves de confiance autour des estimations des coûts des retards et interruptions.

Le modèle a aussi permis à Ingalls d'estimer le rôle des décisions de sa propre direction dans les dépassements. Des simulations de politiques alternatives ont démontré à quel point les coûts et durées du projet auraient pu être réduits si Ingalls avait géré le projet de façon plus efficace. La capacité de quantifier la contribution des interférences du client et de la mauvaise gestion de l'entrepreneur aux retards et dépassements de coûts a été une étape critique du processus. Goldbach (communication personnelle, 1999) a décrit le processus de résolution des disputes avant l'élaboration du modèle de la dynamique des systèmes comme

tout juste des accusations personnelles. Un entrepreneur dira, « Voilà ce que le gouvernement a mal fait » et justifiera tous ses problèmes par ça. Ensuite, le gouvernement envoyait le GAO[ le Bureau de Comptabilité Générale] pour découvrir tout ce que l'entrepreneur avait mal fait. Cela ne menait nulle part.

Le problème était qu'avec les technologies de [gestion de projet] disponibles à l'époque il n'y avait aucun moyen de séparer l'impact des problèmes du gouvernement et de l'entrepreneur ou d'examiner la synergie entre eux. A la fin nous nous devions d'avoir la capacité de dire, « voilà ce que l'entrepreneur a mal fait et voilà ce que le gouvernement a mal fait, et voilà ce que chacun de ces actes a contribué aux dépassements de temps et de coûts ».

L'environnement hostile d'un litige important accentue le besoin d'un modèle robuste, bien compris dont les paramètres et hypothèses peuvent être justifiés avec des données indépendantes. Dans le cadre du processus de partage des preuves de l'action en justice Ingalls devait fournir le modèle, les documents, les analyses, et les données d'appui à la Marine, qui a engagé ses propres experts pour tenter de le discréditer. Une critique courante de ce genre de modèles et que la Marine a utilisée, est que les paramètres et hypothèses sont « cuisinés » pour atteindre un résultat choisi d'avance. « Des ordures en plus ou en moins », affirmèrent les experts de la Marine, et ils soutinrent que le modèle était simplement une ruse compliquée destinée à impressionner le tribunal.

Les experts extérieurs de la Marine étudièrent et critiquèrent le modèle. Après avoir livré leurs rapports, l'équipe de modélisation, avec la direction et les avocats de Ingalls, les responsables de la Marine, les avocats du gouvernement et les experts extérieurs de la Marine se réunirent pendant plusieurs jours dans une grande salle de conférence pour discuter des critiques. Chaque point fut débattu en détail, des points élevés de la méthodologie de modélisation et de l'architecture du modèle aux équations et paramètres spécifiques. Ingalls et l'équipe de modélisation avaient ensuite la chance de répondre. Ils révisèrent le modèle pour répondre aux critiques faites par les experts de la Marine. Au cours du round suivant de réunions, ils expliquèrent à l'équipe de la Marine comment ils avaient modifié le modèle pour intégrer les changements que les experts de la Marine voulaient. Répétant la comparaison entre les exemples tel que construit et aurait été, l'équipe de modélisation trouva que la fraction des dépassements et retards due aux changements de concept de la Marine a en fait augmenté.<sup>10</sup>

La Marine s'attendait clairement à ce que l'intégration au modèle des estimations de paramètres et de critiques de ses experts démontrât qu'une plus grande partie des dépassements était due à la mauvaise gestion de l'entrepreneur. Le résultat contraire que la valeur de la poursuite a augmenté a démontré à tous qu'il est réellement assez difficile de construire un modèle en vue de produire un résultat déjà acquis. Selon Goldbach, « Pour la première fois, la Marine a compris que Ingalls avait un cas crédible ». Commencèrent alors des négociations intenses au plus haut niveau entre Litton et la Marine. En Juin 1978 les parties ont trouvé un accord à l'amiable. Ingalls a reçu 447 million\$.



Ainsi, les clients pour ce travail de modélisation n'étaient pas seulement la direction et les avocats de Ingalls, mais aussi le tribunal et la Marine. Il peut paraître contraire à l'intuition d'inclure l'opposition au groupe du client pour un modèle utilisé dans une poursuite judiciaire. Et en effet la Marine a tenté de discréditer et d'exclure le modèle du procès. Toutefois, dans la mesure où le modèle est devenu le point central, à travers les critiques mêmes des experts de la Marine, les structures dans le modèle et les dynamiques qu'elles ont engendrées commencèrent à devenir le cadre courant de discussion de la poursuite par toutes les parties. Le processus de changement des modèles mentaux était bien lancé. Ce processus a depuis été bien observé dans beaucoup d'autres conflits (voir par exemple, Weil et Etherton 1990, Reichel et Sterman 1990). L'expérience démontre que plus l'opposition comprend le modèle, plus le modèle aura de l'influence dans la résolution du conflit.

Bien qu'il s'agissait là d'un environnement de poursuite judiciaire, le processus s'applique à tous projets de modélisations. Même si ceux qui demandent le travail viennent tous de la même équipe de gestion, il y aura des positions et factions différents, des adeptes et des opposants de chaque politique. Seule l'implication intense des clients dans le processus de modélisation peut créer la compréhension des problèmes nécessaires pour changer des modèles mentaux ancrés et conduire au consensus en faveur de l'action.

10 Vu la technologie de l'époque (des ordinateurs centraux opérant avec des imprimantes télétypes à temps partagé, et des modems coupleurs acoustiques de 100 bauds) exécuter le modèle en direct au cours des réunions n'était pas faisable. Les concepteurs du modèle se souviennent avec peine des sessions durant des nuits entières où le modèle était exécuté sur les plus grands ordinateurs disponibles à l'époque. Aujourd'hui il est possible d'apporter le modèle à des réunions de ce genre sur un ordinateur portable et de faire des changements et hypothèses sur le champ, réduisant le temps d'expérimentation et augmentant considérablement l'implication des clients.

### **2.3.5 Impact Continu**

Le modèle de la dynamique des systèmes a été la seule base technique de la composante des retards et interruptions de l'action en justice d'Ingalls contre la Marine. Les estimations des avocats et de la direction de Ingalls « placent la contribution en dollar du modèle à l'accord à entre 170 et 350 million \$ » (Cooper 1980, pp.28). Mais ces sommes, aussi importantes qu'elles soient, sous-estiment les avantages du processus de modélisation. L'action légale elle-même peut être perçue comme un grand projet qui engendre ses propres effets en cascade. En réalisant un accord un peu plus de 2 ans après le début du processus de modélisation (un intervalle très réduit dans des litiges de cette envergure),

Les coûts directs en dollar de la poursuite de l'action en justice ont été évités [les frais légaux et les frais de procédure]. Cependant, encore plus significative était l'importante somme de temps et de compétences professionnelles et de gestion (une « organisation chargée de la poursuite » entière de Ingalls de plus de 100 personnes) qui aurait continué à servir à autre chose que la conception et la construction de navire... Surtout, l'élimination de l'adversité entre Ingalls et son meilleur client a été un accomplissement marquant (Cooper 1980, p.28).

Depuis ce travail révolutionnaire Pugh-Roberts et d'autres firmes ont continué à appliquer la dynamique des systèmes à des conflits totalisant plusieurs milliards de dollars. Cela va d'autres projets militaires et commerciaux de construction de navires à l'aérospatial et aux systèmes d'armement, usines d'énergie, travaux civils tels que les tunnels, et les logiciels. Dans la plupart des cas les entrepreneurs utilisent les modèles dans les actions contre leurs

clients. Dans chaque cas les accusés ont cherché à discréditer les modèles et à les exclure des témoignages d'experts admissibles mais chaque fois la présentation des modèles a été autorisée et les modèles ont contribué à des accords favorables.

Alors que la valeur en dollar de ces actions est impressionnante et les bénéfices que les plaignants en tirent indiscutables, le dommage (les dépassements de coût) a été déjà fait, et la question est seulement de savoir qui paie. La vraie influence se trouve dans leur utilisation proactive pour que soient évités les dépassements de coût et les retards dès le départ. Depuis le premier modèle de Ingalls, beaucoup d'organisations ont appliqué des modèles similaires à la gestion des projets de grande envergure dans diverses industries (voir les sections 6.3.4 et 14.5 par exemple).<sup>11</sup> Ingalls a lui-même utilisé des dérivés de ce premier modèle pour aider à gérer virtuellement tous ses programmes depuis le LHA et le DD. Les avantages d'une telle modélisation proactive sont plus difficiles à quantifier mais ils l'emportent sur la valeur des résolutions de conflit de plusieurs fois.

A titre d'exemple, Rich Goldbach quitta Ingalls à la fin des années 70 pour diriger Metro Machine, un chantier de constructions de navires basé à Norfolk, Virginie. A l'époque petit et en difficulté, Metro est aujourd'hui un chantier très en réussite spécialisé dans les travaux de réparation et de remise en état pour la Marine avec près de 700 employés et des ventes de près de 90 million par an. Goldbach a introduit un large éventail des pratiques de gestion novatrices y compris l'implication des employés. La firme appartient à 100% aux employés, avec une participation universelle au plan d'actionnariat salarial. Metro a remporté plusieurs prix pour la grande qualité de son travail, y compris le prix de la Meilleure Petite Entreprise Nationale de l'Année et le Prix AEGIS de l'Excellence de la Marine Américaine « pour une performance supérieure en termes de qualité, de fiabilité, de livraison et de coût »- le premier chantier de réparation à recevoir ce prix. Les modèles continuent à jouer un rôle important. Goldbach a commandé le développement d'un modèle de simulation pour prévoir les conséquences financières de différentes décisions pendant 10 ans. Metro utilise le modèle pour évaluer les acquisitions, les décisions d'investissement de capitaux, les nouvelles entreprises, et tous les aspects de la soumission pour les marchés.

Nous avons construit le modèle à partir d'une spécification que j'ai fournie sur la base de ce que j'ai appris du modèle de Ingalls. Le modèle permet au gouvernement de mieux comprendre nos soumissions. Il laisse le DCAA [ l'Agence d'Audit des Contrats de Défense, une agence du Département de la Défense chargée d'auditer les soumissions des entreprises et d'évaluer leur capacité à faire le boulot] examiner des scénarios alternatifs. Nous utilisons le modèle de façon interactive avec eux. Il y a un auditeur du DCAA qui connaît le modèle sur le terrain. Cet auditeur peut nous demander d'exécuter toutes les hypothèses, et en général nous recevons la réponse en une heure (Goldbach, communication privée, 1999).

La simulation financière a été très efficace, mais beaucoup plus importantes, Goldbach affirme, sont les leçons qu'il a apprises sur le défi relatif à la gestion des systèmes complexes :

Pour l'industrie de [construction des navires] je croyais que j'étais un responsable assez sophistiqué, mais ça a changé toutes les perspectives pour moi. Je n'avais jamais eu l'aptitude que je crois avoir reçu de mon travail avec la dynamique des systèmes de demander « quels effets en cascades aura telle décision ? ». J'ai atteint le point où j'avais la discipline mentale de combattre mes pulsions et de ne pas pendre une attitude macho en face d'un problème. Les règles du jeu changent pendant que vous jouez le jeu. Maintenant je me demande comment les clients, employés, fournisseurs

etc. réagiront par rapport à ce qu'on fait. Quelquefois j'ai la bonne réponse, d'autres fois je ne l'ai pas.

Ca pénètre tous les aspects de ma réflexion. Je suis une personne différente de celle que j'étais avant.

Voir aussi Abdel-Hamil et Madnick (1989 a-c, 1990, 1991) ; Cooper (1993 a-c, 1994) ; Cooper et Mullen (1993) ; Ford et Sterman (1998 a-b) ; Homer et al. (1993) ; Weil et Etherton (1990) ; et Yourdon (1993).

## **2.4 Jouer Le Jeu De La Maintenance 12**

En 1991, Wilson Ledet, alors responsable au Gulf Coast Regional Manufacturing Services à Du Pont, a fait une réflexion sur les résultats d'une étude de référence interne établissant un grand fossé entre les dossiers de maintenance de Du Pont et ceux des compagnies utilisant les meilleures pratiques au sein de l'industrie chimique dans son ensemble.

L'étude portant sur les critères de référence a relevé un paradoxe apparent : Du Pont dépensait plus pour la maintenance que les leaders de l'industrie mais recevait moins en retour pour ses efforts. Du Pont avait le plus grand nombre d'employés à la maintenance par dollar de la valeur de l'usine pourtant ses mécaniciens faisaient plus d'heures supplémentaires. Les stocks des pièces de rechange étaient en excès pourtant les usines dépendaient beaucoup de l'expédition de coûteuses acquisitions de pièces critiques. Plus troublant, Du Pont dépensait 10-30% de plus pour la maintenance par dollar de la valeur de l'usine que les leaders de l'industrie, au même moment où le total de l'usine était 10-15% inférieur.

Beaucoup de gens ont trouvé les résultats de l'étude de référence paradoxaux. Leurs modèles mentaux suggéraient que la qualité du matériel devrait souffrir et le temps de travail baisser dans une compagnie qui dépense peu pour la maintenance, alors que dépenser plus pour la maintenance devait produire du matériel de grande qualité et des temps de travail élevés. Comment Du Pont pouvait-il dépenser plus et recevoir moins ?

Beaucoup de personnes ont fait allusion à l'environnement concurrentiel difficile pour expliquer le problème. L'industrie chimique est mûre et très compétitive. Parce qu'il y a peu de différenciation de produit pour la masse des stocks d'alimentation (commodités), la concurrence entre les fabricants de produits chimiques se passe à d'autres niveaux, surtout au niveau des coûts et de la fiabilité des livraisons. Depuis le début des années 70 l'industrie a connu une succession de crises : deux crises énergétiques sévères ont causé des ravages aux entrées et aux coûts opérationnels. Toujours cycliques, les trois récessions les plus terribles depuis la Crise de 1929 ont causé des excès de capacité répandus. De nouveaux concurrents de la ceinture du Pacifique et les pays riches en pétrole du Moyen Orient ont pénétré le marché. Les préoccupations d'ordre environnemental et les régulations augmentaient.

Ledet était au courant de tout cela ; il avait traversé toutes ces crises pendant les 25 ans qu'il a passés avec Du Pont. Mais rejeter le problèmes sur des forces externes, bien que psychologiquement sûr, n'apportait aucun moyen d'améliorer la situation. Ledet avait le sentiment que l'explication du paradoxe ne se trouvait pas dans les pressions externes auxquelles la compagnie a été confrontée pendant deux décennies turbulentes, mais dans sa réaction par rapport à ces pressions.

12 Je dois à Winston P. Ledet et Winston J Ledet (principes, le Jeu de la Fabrication), Paul Montis (BP Chemicals) et Mark Paich (Université du Colorado) pour la permission qu'ils m'ont accordée de présenter leurs travaux et pour leur aide à la préparation du matériel. Merci aussi à Tony Cardelti, Mark Downing, Vince Hymn, et au reste de l'équipe de Du Pont.

Ledet et son équipe avaient besoin d'un moyen pour explorer la façon dont les différentes composantes de la maintenance agissaient entre elles, expliquer la raison de l'échec des tentatives d'amélioration passées, et aider à la conception de nouvelles politiques. Et ils avaient besoin d'expliquer ces dynamiques complexes au personnel d'opération et de maintenance des usines expérimenté qui devait prendre des mesures.

Ledet et son équipe ont commencé le développement d'un modèle de simulation pour capter les avantages dynamiques et les coûts des différentes initiatives de maintenance à travers le système. Ils ont développé le modèle avec l'aide d'un modélisateur expérimenté, Mark Paich. Le modèle fut développé de façon interactive, avec la participation de Ledet et d'autres membres clés de l'équipe. Le rôle de l'expert en modélisation était plus celui de coach et de facilitateur, et le processus de modélisation impliquait d'importants ateliers pratiques au cours desquels le modèle fut débattu, testé et modifié à temps réel parallèlement à l'identification par les membres de l'équipe de modélisation des problèmes ou des points à améliorer.

Du Pont, comme la plupart des grandes firmes, utilisaient déjà un certain nombre d'outils de planification de la maintenance. Ces outils avaient tendance à se focaliser sur la complexité du détail du défi de la maintenance, par exemple, les banques de données pour suivre l'histoire de la maintenance de chaque pièce du matériel, des modèles statistiques pour optimiser les calendriers de la maintenance, des systèmes de programmation pour assigner des travaux planifiés et réactifs au mécaniciens, etc.. Ces outils sont importants pour la gestion quotidienne des grandes usines mais ils ne capturent pas la complexité dynamique du système de maintenance. Alors que les modèles détaillés de planification et de programmation suivaient chaque pompe et moteur dans l'usine de façon séparée, le modèle dynamique traitait ces facteurs de façon endogène. Il englobait des problèmes techniques tels que les caractéristiques du matériel, des problèmes logistiques tels que la disponibilité des pièces de rechange, la programmation de la maintenance, et les tâches de mécaniciens ; des problèmes de ressources humaines tels que la compétence des mécaniciens, leur formation, et leur motivation ; et des problèmes financiers y compris les budget de la maintenance, l'allocation des ressources, et la performance d'ensemble de l'usine. Le modèle de la dynamique des systèmes était un complément aux, et non un remplaçant des outils de planification et de programmation existants.

### **2.4.1 Hypothèse Dynamique**

Utilisant le modèle comme laboratoire de conception et de test des différentes politiques, l'équipe a progressivement développé une appréciation de la complexité dynamique du système de maintenance. L'hypothèse dynamique qu'elle a développée expliquait le paradoxe que Du Pont dépensait plus pour la maintenance et recevait moins en retour en termes de temps de travail et de fiabilité du matériel.

Le processus de modélisation a conduit à plusieurs changements conceptuels importants sur leur perception de la maintenance. Avant le travail de modélisation la maintenance était largement perçue comme un processus de correction des défauts (la réparation du matériel défaillant) et la fonction de maintenance était perçue comme un coût à minimiser. Le premier

changement conceptuel était de changer le point d'intérêt de la correction des défauts à la prévention des défauts et à leur élimination. Le modèle s'est donc focalisé sur le caractère physique des pannes plutôt que sur la mentalité de minimisation des coûts qui prévalait à travers l'organisation. Le matériel tombe en panne quand un nombre suffisant de défauts latents s'y accumule. Les défauts latents sont tous problèmes pouvant causer de façon ultime une panne. Ils incluent les fuites au niveau des joints d'étanchéité des pompes, les équipements sales qui font que les ports s'usent, les axes des pompes et des moteurs mal ajustés et causant des vibrations, une instrumentation mal calibrée, etc.. Une pompe dont les joints ont des fuites ou dont les ports sont sales peut toujours marcher mais finira par tomber en panne à moins de corriger ces défauts latents.

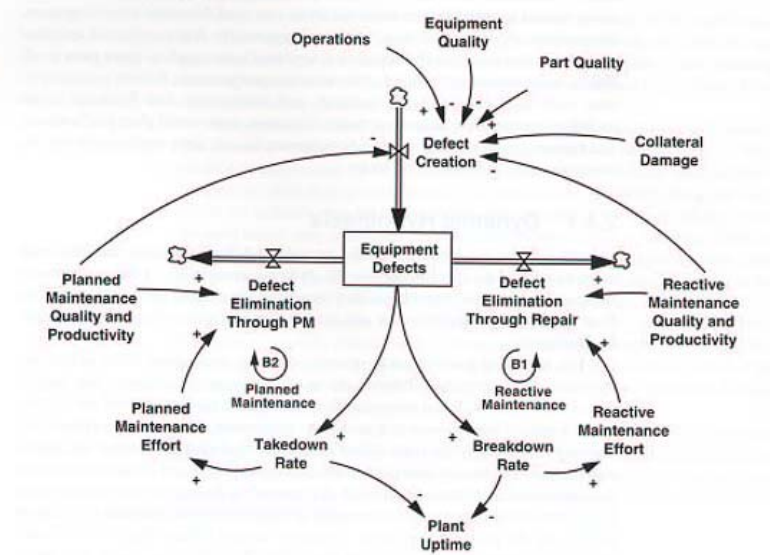
L'ensemble des défauts du matériel d'une usine est un stock (Figure 2-8). Les défauts sont créés par l'utilisation (usage normal et déchirure) et par les dommages collatéraux dus aux pannes (quand il y a fuite de carburant des ports de la pompe et quand les ports sont saisis, l'axe peut se tordre, le moteur peut chauffer, et la vibration peut rompre les couplages et les tuyaux, introduisant de nouveaux problèmes). De façon plus subtile, l'activité de maintenance peut créer de nouveaux défauts, à travers les erreurs des mécaniciens et l'utilisation des pièces de rechange de mauvaise qualité. Plus la qualité intrinsèque du concept du matériel est mauvaise, plus les activités de maintenance créent des défauts.

Le stock des défauts est tiré par deux flux : la maintenance réactive (la réparation du matériel en panne) et la maintenance planifiée (la réparation proactive du matériel opérable). 13 Toutes ces activités forment une boucle de réaction d'équilibre. Les chances qu'une panne arrive augmentent parallèlement à l'accumulation des défauts. Les pannes entraînent un plus grand nombre de réparations réactives, et, après la réparation, le matériel reprend du service et le stock des défauts est réduit (la boucle B1 de la Maintenance Réactive). De même, la maintenance prévue ou le suivi du matériel peut révéler la présence de défauts latents (une pompe qui vibre, une fuite d'huile). Le matériel est ensuite retiré du service et les défauts sont corrigés avant qu'une panne ne se produise (la boucle B2 de la Maintenance Planifiée).

**Figure 2-8**

**FIGURE 2-8** Defect creation and elimination

The diagram is simplified. In the full model equipment was divided into operable, broken down, and taken down for planned maintenance, with an associated stock of latent defects for each category.



A l'évidence, les pannes réduisent le temps de travail de l'usine. En plus, la plupart des activités de maintenance planifiée nécessitent que le matériel opérable soit fréquemment retiré du service pour que le travail requis puisse se faire. La Figure 2-8 montre seulement les aspects physiques et les accumulations de défauts les plus basiques. Les deux réactions négatives régulant le stock des défauts semblent être symétriques : les défauts peuvent être éliminés soit par la maintenance planifiée soit par la réparation du matériel en panne. Le système complet est plus complexe, cependant, et comprend un certain nombre de réactions positives qui se renforcent mutuellement (Figure 2-9).

**FIGURE 2-9** Positive feedbacks undercutting planned maintenance

78

matériel plus longtemps et de façon plus agressive que ne l'indiquent les spécifications de la conception), ce qui augmente le volume du travail de maintenance. Avec des ressources pour la maintenance planifiée en diminution et des besoins en maintenance en augmentation, le stock des défauts augmente. Les pannes augmentent. Les pannes provoquent des dommages collatéraux, augmentant encore plus le stock des défauts de façon directe et entraînant encore plus de pannes dans un cercle vicieux (la boucle positive R1). Parce que le nombre de mécaniciens est limité, plus de pannes enlèvent obligatoirement les mécaniciens des travaux planifiés au moment où la direction confie de nouveaux travaux de réparation aux mécaniciens. Mais beaucoup de mécaniciens préfèrent aussi les travaux de réparation. Un responsable de la maintenance planifiée expliquait, (nous avons eu plusieurs personnes qui affirment qu'elles veulent être impliquées dans le travail préventif mais quand il y a rupture de stock et [qu'elles] ont l'opportunité de faire 14-16 heures supplémentaires par semaine elles disent « au diable avec cette histoire de [suivi] de la vibration, je vais là où il y a la rupture de stock. –Avec moins de travaux planifiés, les pannes augmentent encore plus, formant la boucle R2 Aller à la Rupture de Stock.

Le taux en augmentation des pannes signifie que un plus grand nombre de matériel critique sera hors service dans l'attente d'une réparation. Le temps de travail de l'usine chute. Il devient plus difficile pour les opérateurs de l'usine de satisfaire la demande. Quand un mécanicien ou un superviseur de maintenance demande qu'une certaine pièce du matériel soit retirée de la production en vue de corriger des défauts latents, il est probable que le responsable de production sous pression dira quelque chose du genre « J'ai du mal à satisfaire la demande actuelle et vous voulez que j'arrête cette production ? Pas question. Si vous faisiez votre travail à la maintenance, je ne me serais pas retrouvé avec autant de pompes en pannes de toute façon. Maintenant, dégagez, j'ai une usine à faire tourner ». La boucle d'équilibre (B3) Trop Occupé pour PM signifie que les opérateurs sont moins enclins à retirer le matériel en état de marche pour la maintenance planifiée si le temps de travail est réduit. Cependant, les effets secondaires de cette politique sont une plus grande augmentation des défauts et des pannes et encore moins de temps de travail. L'usine se retrouve lentement sur une pente glissante (la boucle de renforcement R3) dans le piège des grandes pannes et du temps de travail réduit, avec des ressources de maintenant presque exclusivement consacrées à la gestion de crises, le travail de sapeur pompier, et le travail de réparation.

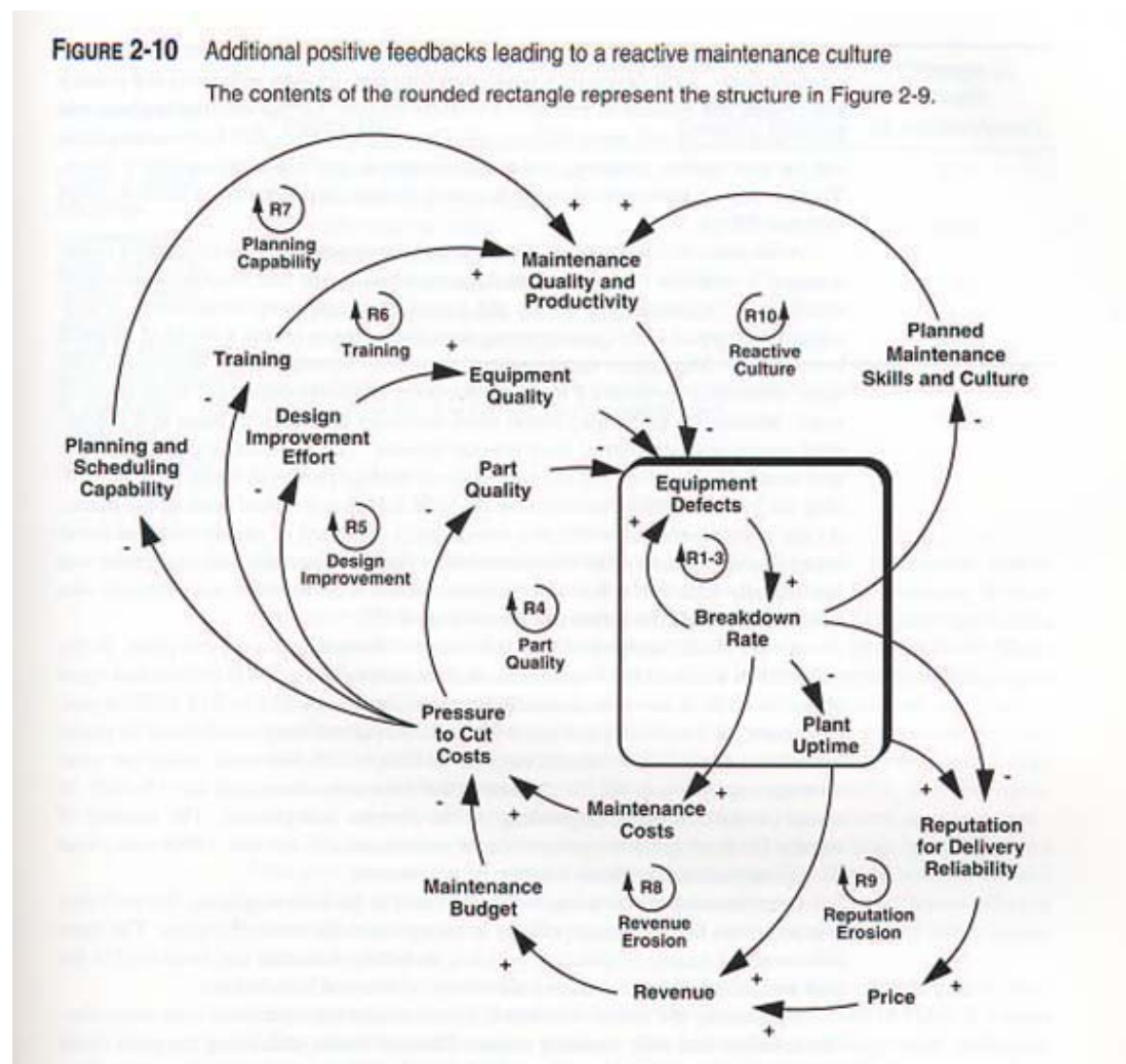
Les réactions positives R1 à R3 agissent assez rapidement mais ne sont pas les seuls cercles vicieux pouvant pousser une usine dans le piège de la fiabilité réduite et des coûts élevés. Les réactions opérationnelles dans la Figure 2-9 sont enracinées dans un système plus vaste qui apparaît sur la Figure 2-10.

Un taux plus élevé de pannes augmente les coûts (à cause des heures supplémentaires, du caractère non routinier et souvent hasardeux des ruptures de stock, du besoin d'expédier l'acquisition des pièces de rechange, des dommages collatéraux etc.). La pression résultante pour réduire les coûts conduit à une chute de la qualité des pièces, augmentant le stock des défauts du matériel et entraînant encore plus de pannes et des coûts encore plus élevés (la boucle R4 de la Qualité des Pièces). Les pressions de coût réduisent aussi l'investissement dans la remise à niveau du matériel et dans l'amélioration de concept, ainsi les pannes augmentent d'avantage (la boucle R5 d'Amélioration du Concept). La formation des travailleurs de la maintenance est réduite parallèlement à la montée des coûts, en particulier la formation dans les techniques de maintenance planifiée (la boucle R6 de Formation). Les pressions de coût obligent aussi le département de la maintenance à réduire ses effectifs. Les premiers à partir sont les planificateurs et ceux chargés du programme- à la différence des mécaniciens, ils ne réparent rien en réalité, et avec de moins en moins de maintenance planifiée en cours, ils ont peu à faire. Sans planification avancée, les revues des pièces,



l'historique du matériel, et les dessins d'ingénierie pour les travaux de maintenance sont moins disponibles, réduisant encore plus la qualité du travail (la boucle R7 de la Capacité de Planification).

**Figure 2-10**



Un ensemble parallèle de réactions se renforçant mutuellement agit pour réduire le budget de la maintenance pendant que les coûts augmentent. Un temps de travail réduit gêne la production et réduit par conséquent les revenus, imposant des réductions de budget à travers l'organisation. Pire, des taux de panne élevés et un temps de travail réduit signifient que l'usine est moins capable de respecter ses engagements de livraison. Tandis que sa réputation à ne pas tenir ses engagements grandit les prix qu'il peut fixer et le volume de ses affaires chutent, érodant d'avantage les revenus et les bénéfices et imposant encore plus de réductions de budget. Les pressions de coût augmentent encore plus, accélérant les boucles de qualité des pièces, de formation, d'amélioration de concept, et de capacité de planification. Ces boucles sont résumées sous le nom de boucles (R8 et R9) d'Erosion des Revenus et de Réputation.

Après quatre ans de pression des coûts, Du Pont avait développé une culture de maintenance réactive. Un matériel non fiable et des pannes à répétition étaient devenues des faits acceptés.



Les normes organisationnelles et de routine pour rédiger les ordres de travail, programmer les efforts de maintenance, et commander les pièces en étaient venues à refléter un environnement de pannes fréquentes. Les mécaniciens passaient la plupart de leur temps à jouer aux pompiers. Les mécaniciens programmés pour la maintenance planifiée étaient régulièrement retirés pour effectuer des travaux réactifs. Les mécaniciens savaient qu'ils pouvaient travailler des heures supplémentaires de façon régulière et considéraient les paiements d'heures supplémentaires comme un revenu régulier. La connaissance que le matériel n'était pas fiable a même entraîné l'installation des pompes de réserve sur beaucoup de sites, ancrant la culture de moindre fiabilité dans le plan physique et les coûts d'investissements de l'usine. Au fil des ans, la main d'œuvre était de plus en plus constituée de gens n'ayant rien connu d'autre que le régime réactif. Pour eux, le matériel était intrinsèquement non fiable, les temps de travail réduits normaux, et la maintenance réactive une affaire courante (la boucle R10 de la Culture Réactive).

Au moment où le modèle prenait forme, il a été calibré pour représenter une usine type. Au début des années 90 une usine chimique typique de Du Pont était évaluée à 400 million \$ et consacrait annuellement près de 33,5% de sa valeur à la maintenance, soit 12 à 14 million\$ /an. Le dépôt des pièces de rechange contenait plus de 60.000 pièces. A peu près 90 mécaniciens y travaillaient qui pouvaient remplir jusqu'à 25.000 ordres de travail par an. Le temps de travail moyen était de 83.5%. Les dépenses de maintenance comptaient pour 15-40% des coûts de production directs, selon le processus et le produit. La somme d'argent que Du Pont dépensait à travers la compagnie pour la maintenance à la fin des années 80 était de près de 1 milliard / an, une proportion considérable du revenu net.

Une fois que le modèle a été calibré de façon adéquate par rapport aux données historiques, l'étape suivante consistait à concevoir des politiques de levier importantes pour échapper au régime réactif. L'équipe simula l'impact des différentes politiques, y compris celles qui avaient été tentées et échoué par le passé. Le Tableau 2-1 montre les résultats de simulations choisies.

Optimiser l'utilisation de la programmation seulement, dans l'état d'esprit traditionnel de minimisation des coûts, a eu seulement un impact modeste. A travers une meilleure programmation l'usine pouvait toujours atteindre son temps de travail traditionnel de 83.5% avec 10% de mécaniciens en moins, engendrant des économies de 350.000\$/an. Exécuter une succession entière de politiques de maintenance proactive, y compris des systèmes de planification, des pièces, d'une ingénierie fiable meilleurs, etc., a permis à l'usine de réaliser le temps de travail traditionnel avec seulement 61 mécaniciens, économisant 1,2 million\$/an.

Toutefois, déployer la même succession de politiques proactives sans réduire les effectifs a permis une augmentation de plus de 93% du temps de travail et a généré 9 million\$/an de bénéfices supplémentaires. Pourquoi une telle différence ? L'approche de minimalisation des coûts signifie que toutes améliorations de la productivité engendrées par l'adoption des techniques de maintenance améliorées sont automatiquement récoltées comme des réductions de nombre des travailleurs. Les ressources pour la maintenance planifiée demeurent sous pression. L'organisation continue à faire un travail de pompier et à se focaliser sur la maintenance réactive mais le fait de façon plus efficace. Par contre, exécuter les nouvelles politiques sans réduire les effectifs libère des ressources qui peuvent être réinvesties toujours dans d'autres maintenances planifiées. Tandis que les pannes diminuent, encore plus de mécaniciens sont retirés du travail de pompier et des ruptures de stock pour faire encore plus de travaux prévus. Les frais de maintenance diminuent, libérant des ressources qui peuvent être investies dans la formation, la qualité des pièces, l'ingénierie de fiabilité, les systèmes de planification et de programmation, et d'autres activités qui réduisent d'avantage les défauts et

les pannes. Un temps de travail plus grand produit plus de revenus et génère des ressources supplémentaires pour encore plus d'améliorations. Par exemple, améliorer le joints des pompes pour les rendre plus durables améliore la fiabilité, permettant de prolonger l'intervalle entre les maintenances et de réduire les stocks des joints de rechange.

**Table 2-1**

<b>TABLE 2-1</b> Results from selected policy simulations				
<b>Policy Mix</b>		<b>Head Count</b>	<b>Uptime</b>	<b>Change in Profit (\$ million/year)</b>
Cases 1 and 2: Minimize maintenance costs subject to uptime $\geq$ initial uptime. Case 3: Maximize plant profit subject to mechanic headcount $\leq$ initial headcount.	0. Typical plant under existing policies	91	83.5	0.00
	1. Use scheduling to minimize maintenance costs	82	83.5	0.35
	2. Minimize costs via full suite of proactive maintenance policies	61	83.5	1.20
	3. Maximize plant profit via full suite of proactive maintenance policies	91	93.3	9.00
		Source: Winston Ledet, Mark Paich, Tony Cardella, and Mark Downing (1991), "The Value of Integrating the CMLT Key Pursuits," Du Pont internal report.		

Toutes les boucles positives qui agissaient avant comme des cercles vicieux pour faire baisser la fiabilité deviennent des cercles vertueux, réduisant progressivement et de façon cumulée les pannes et améliorant le temps de travail. Le résultat est une grande synergie, avec l'effet combiné des politiques individuelles dépassant de loin la somme de leurs impacts chaque fois qu'elles sont exécutées individuellement.

Le modèle a aussi révélé un aperçu important à propos du chemin de transition suivant l'exécution des nouvelles politiques. Les résultats des simulations dans le Tableau 2-1 démontrent que les politiques de maintenance proactives associées au réinvestissement des résultats réduit finalement les coûts et améliorent le temps de travail. Cependant, immédiatement après l'exécution, les coûts de maintenance augmentent et le temps de travail diminue. Pourquoi ? Il faut un certain temps au travail planifié pour réduire le taux de pannes ; à court terme l'usine doit supporter le coût des travaux de maintenance et des efforts de maintenance planifiée supplémentaires à la fois. Le temps de travail baisse parce que du matériel fonctionnel supplémentaire doit être retiré de la production afin que la maintenance planifiée puisse se faire. Plus tard seulement, au moment où le stock des défauts latents commence à baisser, le taux des pannes baisse. Pendant que le taux baisse, les dépenses diminuent et le temps de travail augmente. Ce comportement du pire avant le meilleur est assez courant dans les systèmes complexes. Toutefois, si les responsables ne comprennent pas pourquoi il arrive et pendant combien de temps il peut durer, ils peuvent interpréter la détérioration à court terme des performances comme une preuve que les politiques ne sont pas bonnes et les abandonner ensuite.

## 2.4.2 Le Défi de la Mise en Œuvre

Ledet et ses collègues avaient le sentiment que les nouvelles perspectives qu'ils ont développées par rapport au problème de la maintenance pouvaient améliorer la contribution du programme de maintenance de Du Pont à la rentabilité de la compagnie. Maintenant le défi qui se posait à eux consistait à mettre en œuvre les changements nécessaires. L'équipe a

produit un document en blanc détaillant les résultats de l'étude de modélisation et a fait des présentations à travers toute l'organisation. Le résultat ? Rien. Les gens disaient : « Nous savons déjà que la maintenance planifiée est une bonne idée, » « Nous avons tenté d'appliquer ces politiques et ça n'a pas marché », ou « Votre modèle n'explique pas x. »

Ledet a réalisé que le groupe de clients pour le projet –le groupe des gens dont le comportement devait changer pour atteindre quelque résultat que ce soit- était beaucoup plus grand que l'équipe de gestion chargée de la maintenance. Rien ne pouvait être fait sans la coopération et la participation volontaire d'un grand nombre de responsables de production, d'opérateurs de machines et de mécaniciens de la maintenance. Le groupe des clients s'élevait à plusieurs milliers. Réfléchissant sur leur propre processus d'apprentissage, les membres de l'équipe de modélisation ont réalisé que leurs perceptions avaient radicalement changé parce qu'ils avaient participé à un processus de modélisation itératif. Ils avaient vu le modèle évoluer, l'avaient remis en cause et l'avaient remis en question, avaient vu leurs préoccupations prises en compte, et avaient connu le processus d'élaboration des structures de réaction qui expliquaient la dynamique du système. D'une certaine façon, il leur fallait recréer ce processus d'apprentissage dans toutes les usines, de la direction aux grades les moins élevés des mécaniciens.

A l'évidence il était impossible que les milliers de gens que l'équipe de modélisation devait toucher participent tous à des ateliers de modélisation ou même que tous ces gens reçoivent le modèle pour y travailler d'eux-mêmes. Aucun d'entre eux n'avait reçu de formation en dynamique des systèmes ou en modélisation par ordinateur. Les superviseurs de production et les mécaniciens chargés de la maintenance n'avaient pas la patience de suivre des présentations pleines de figures et de diagrammes.

Ledet connaissait le Jeu de Distribution de Bière, un simulateur de vol de gestion du jeu de rôle de la chaîne d'approvisionnement d'une usine développé par le Groupe de la Dynamique des Systèmes de MIT pour servir d'introduction à la pensée des systèmes. 14 Assisté de son fils, Ledet a converti le modèle de la maintenance en simulation de jeu de rôle interactive qu'ils ont appelée le jeu de la fabrication (voir Ledet 1999). Le jeu a été intégré à un atelier de deux jours ou laboratoire d'apprentissage conçu pour être très interactif, pour mettre les gens à l'aise, et pour créer un environnement d'apprentissage qui traitait des problèmes à la fois émotionnels et cognitifs.

Le jeu simule une usine typique. Il y a trois rôles : le responsable des opérations, le responsable de la maintenance, et le responsable des dépôts de pièces de rechange. La tâche du responsable des opérations est de satisfaire la demande et il a le matériel, représenté par des puces, pour le faire. Tandis que la production se poursuit, des marques rouges représentant les défauts latents sont faites sur les puces du matériel. Quand il y a une accumulation suffisante de marques rouges, le matériel tombe en panne et la capacité baisse. Le responsable de la maintenance doit alors fournir des mécaniciens pour réparer le matériel et aller au dépôt des pièces de rechange pour voir si les pièces dont il a besoin (déterminées par un coup de dés) sont disponibles. Si les pièces se trouvent dans le dépôt, les équipements sont réparés. Dans le cas contraire, les mécaniciens doivent attendre jusqu'à ce qu'elles soient disponibles ou payer pour qu'elles leur soient expédiées. De façon alternative, le responsable de la maintenance peut programmer un travail planifié, commandant les pièces demandées et allouer les mécaniciens à l'avance. Cependant, la maintenance planifiée peut être faite seulement si le responsable des opérations accepte de retirer du service du matériel opérationnel. A chaque round les participants prennent des décisions telles que le nombre de matériel à retirer pour la maintenance planifiée, la façon dont il faut allouer les mécaniciens et les ressources de la maintenance, et le nombre de pièces de rechange à commander. Les

revenus et coûts sont enregistrés, à côté de la production, du temps de travail, des stocks, etc.. Alors que le jeu est très simplifié comparativement aux vraies usines, et même comparativement au modèle de simulation original, il capte de façon réaliste les retards, coûts et autres paramètres caractérisant une usine.

Malgré ces nombreuses simplifications le jeu devient rapidement une vraie usine à beaucoup d'égards, avec de vraies émotions et de vrais conflits entre les joueurs. Initialisées avec des pannes importantes et un temps de travail réduit, les tentatives faites par le responsable de la maintenance pour augmenter la maintenance planifiée sont souvent repoussées par le responsable des opérations, qui est confronté à d'intenses pressions pour satisfaire la demande, juste comme dans la réalité.

Les équipes qui s'accrochent aux politiques de minimisation des coûts et de maintenance réactives prévalant sont en mesure de maintenir les coûts bas pour un temps. Mais comme les défauts s'accumulent ils voient leur temps de travail fondre lentement et les coûts monter progressivement. Les équipes qui suivent une stratégie de maintenance planifiée voient

14 Le Jeu de Distribution de Bière est une introduction amusante et efficace non seulement à la gestion des chaînes d'approvisionnement mais aussi aux principes de pensée des systèmes en général (voir le chapitre 17 ; aussi Sterman 1989b, 1992 et Senge 1990 pour descriptions, mais pas avant d'avoir joué le jeu) immédiatement leurs coûts monter et leur temps de travail baisser au moment où le matériel est retiré de la production pour la maintenance planifiée. Toutefois, les coûts commencent bientôt à baisser et le temps de travail monter. En condensant le temps le jeu permet aux gens de vivre la dynamique du pire avant le mieux en quelques heures au lieu de quelques mois.

Deux membres de l'équipe d'exécution au complexe des Travaux de Washington de Du Pont à Parkersburg, Virginie de l'Ouest, ont décrit la façon dont ils ont utilisé le jeu pour catalyser un programme d'amélioration à base élargie :

L'équipe a été initiée grâce à un laboratoire d'apprentissage de deux jours...apprenant le concept d'élimination des défauts et jouant le Jeu de la Fabrication...Les concepts de base sont présentés de façons différentes afin que tous les modes d'apprentissage soient utilisés- visuels, auditifs et kinesthésiques. Le matériel est présenté sous la forme de cours, de pièces satiriques et d'exercices participatifs dans un milieu éloigné du site. Des affiches et la musique sont utilisées. L'atmosphère est très différente des réunions ou formations routinières à l'usine, pour ouvrir les esprits... A travers des exercices interactifs, les équipes développent leurs aspirations personnelles pour améliorer les endroits où elles ont choisi de travailler...[Ensuite] elles élaborent un plan d'action pour commencer le travail immédiatement. 15

Le jeu et le laboratoire d'apprentissage se sont révélés populaires à travers toute la compagnie. Mais l'exécuter une fois avec un petit groupe de responsables n'était pas suffisant. L'équipe s'est vu obligée de diriger plusieurs ateliers pour une usine donnée avant que n'émerge une masse critique de gens pour mener les équipes d'action qui pratiquaient les politiques de maintenance proactive. Souvent l'usine devait développer sa propre capacité à exécuter le jeu et l'atelier pour pouvoir le faire à la demande de ses employés, avec une expérience et une autorité spécifiques à leur site. Ainsi l'équipe de Ledet a eu à former un groupe de facilitateurs et à développer un processus de formation afin que la qualité de l'atelier puisse être maintenue alors qu'il se propageait à travers l'usine. La demande pour les ateliers a augmenté lentement au départ, mais comme les propos favorables sur l'expérience

se répandaient, de plus en plus d'usines ont demandé au groupe de Ledet d'exécuter le programme pour elles. L'augmentation des demandes a réduit le nombre de facilitateurs de talent, qui restait à la traîne. A la fin de 1992 quelque 1200 personnes avaient pris part aux ateliers et plus de 50 facilitateurs avaient été certifiés.

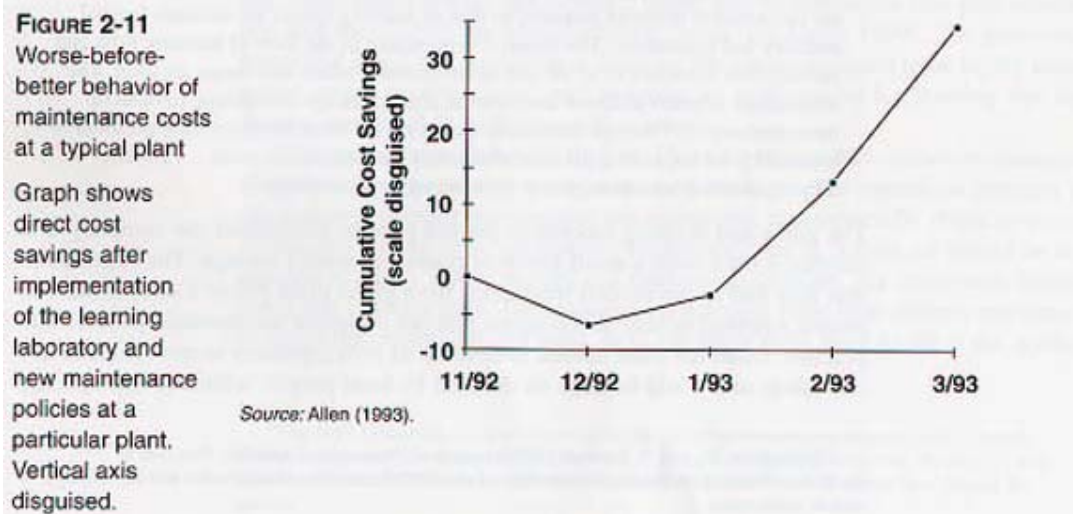
15 Tewksbury, R., et R. Stewart (1997) Programme Amélioré de Capacité de Production aux Travaux de Washington de Du Pont, Travaux de la conférence annuelle de la Société pour la Maintenance et la Fiabilité de 1997.

### 2.4.3 Résultats

En 1994 un certain nombre d'usines à travers la région de la Gold Coast avaient adopté le laboratoire d'apprentissage et les politiques associées. La Figure 2-11 montre les économies sur les coûts de maintenance directs pour une usine spécifique après l'exécution du programme. Juste comme on vient de le voir dans le modèle et le jeu, le premier effet des nouvelles politiques est une augmentations des coûts. C'est seulement après plusieurs mois que les économies de coût commencent à s'accumuler.

Parmi les usines qui ont exécuté le programme à la fin 1993, le temps moyen entre la défaillance (MTBF) des pompes (le point d'intérêt du programme) a augmenté en moyenne de 12% chaque fois que l'expérience d'opération cumulative a doublé, alors que les coûts de maintenance directs ont baissé en moyenne de 20%. Dans 23 usines comparables n'exécutant pas le programme, le taux d'apprentissage s'élevait en moyenne à tout juste 5% par doublement d'expérience cumulative et les coûts étaient en hausse de 7% en moyenne (Carroll, Sterman, et Marcus 1998). Le programme aux Travaux de Washington a augmenté la capacité de production nette de 20% amélioré le service client de 90%, et réduit le temps menant à la livraison de 50%, le tout avec un investissement en capital minimal et une réduction des coûts de maintenance. Il est difficile d'estimer tous les avantages du programme pour la compagnie dans son ensemble, mais les estimations conservatrices dépassent 350 million \$/an pour les frais de maintenance évités.

**Figure 2-11**



Cependant l'histoire ne finit pas là. La réussite crée ses propres défi. Qu'est-ce qui arrive à une usine qui a réussi à améliorer les MBTF et à améliorer les dépenses de maintenance ? Un des problèmes était relatif à la persistance de la mentalité de minimisation des coûts. Un membre de l'équipe de modélisation commente, « Dès que vous parvenez à réduire les

problèmes, des gens sont retirés de l'effort et le problème augmente encore ». En fait, les programmes de réduction des coûts ordonnés par les sièges des compagnies ont provoqué des réductions d'effectifs considérables à travers toute la compagnie et ont limité sa capacité à élargir le programme.

Un autre problème pour Du Pont était comment récompenser l'équipe de modélisation. Ledet croyait que le jeu et le laboratoire d'apprentissage avaient un énorme potentiel pour stimuler l'amélioration dans un grand nombre de compagnies et d'industries. Il commença à recevoir des demandes d'autres firmes intéressées à utiliser le jeu. Ledet acquit les droits sur le jeu de Du Pont, prit sa retraite anticipée, et devint un entrepreneur, travaillant avec d'autres compagnies pour mettre en œuvre l'approche. Ces firmes comprennent d'autres fabricants de produits chimiques et des firmes dans les secteurs de l'énergie, de l'automobile et de la haute technologie.

#### **2.4.4 Transférer l'Apprentissage: l'Expérience de Lima**

British Petroleum (BP) est une des organisations qui adopta le jeu de la maintenance et d'autres outils de la dynamique des systèmes.<sup>16</sup> La raffinerie de BP à Lima, Ohio, fut construite en 1886 par John D. Rockefeller pour fournir le carburant et les produits pétrochimiques au Midwest. Encore une fois la « Queen of the Fleet » (la Reine de la Flotte), les réductions de coûts des années 1980 a conduit au même spiral d'augmentation des pannes, de baisse de la performance, et d'avantage de réduction des coûts qui avaient poursuivi Du Pont. Au début des années 90s les performances de BP étaient médiocres et la compagnie était à la traîne des autres raffineries aux Etats Unis. Des programmes avaient été tentés pour améliorer la situation, avec un succès limité, et BP avait commencé à considérer la vente de l'installation en même temps qu'il cherchait à réduire les coûts.

En 1994, la raffinerie de Lima introduisit le laboratoire d'apprentissage de la maintenance et le jeu avec d'autres outils de la dynamique des systèmes tels que le Jeu de Distribution de Bière. Il ne s'agissait pas là d'une intervention de la direction générale : au départ le jeu a été soutenu par un spécialiste des équipements, un superviseur de la formation en maintenance, et un ingénieur, Paul Monus, qui travaillait à l'époque à l'amélioration continue. Des projets pilotes réussis ont conduit la direction de la raffinerie à exécuter le programme pour 80% des employés. Bientôt, des douzaines d'équipes d'amélioration furent en place. Au cours des 6 premiers mois, les coûts de maintenance ont augmenté de 30%. Cependant, la direction était prête pour cette dynamique du pire avant le mieux, et s'est focalisée sur les améliorations engendrées par les équipes d'action. Le mouvement a commencé à prendre de l'ampleur.

En Janvier 1996 BP annonça qu'il avait l'intention de vendre sa raffinerie de Lima et accéléra ses réductions de coûts et d'effectifs. Quelques mois plus tard, BP causa la stupéfaction de ses employés en annonçant qu'il n'était pas parvenu à trouver un acheteur à un prix satisfaisant et que par conséquent, il s'appropriait à fermer la raffinerie.

L'annonce a été un coup dur pour les employés et la ville. La raffinerie de Lima était l'un des plus importants employeurs dans la communauté, occupant 650 acres d'immeubles de première classe et générant 400 emplois avec une masse salariale, des services et autres paiements injectant plus de 60 million\$/an dans l'économie en crise de Lima.

<sup>16</sup> BP fusionna avec Amoco en 1998, après le travail décrit ici.

Certains employés furent saisis de découragement et ne voyaient plus l'utilité de continuer le programme d'élimination des défauts et de la maintenance proactive. Certains rejoignirent d'autres installations de BP ou partirent simplement. Winston Ledet a décrit ce qui suivit :

Pour ceux qui choisirent de rester sur le bateau, un nouvel état d'esprit vit le jour. Ils réalisèrent qu'il leur fallait un avenir à Lima et qu'ils devaient assumer leurs responsabilités dans la création de cet avenir. La première chose à faire était de s'assurer que le départ de beaucoup de personnes expérimentées ne les replongerait pas dans la mode réactive. Cela augmenta le sens d'urgence de procéder à l'élimination des défauts. La situation a en fait provoqué un effort d'attention pour ceux qui demeurèrent. Ils étaient tous là parce qu'ils avaient choisi de rester. 17

Bientôt l'impact cumulatif des nouvelles politiques de maintenance devint évident dans les performances de l'usine. Le Tableau 2-2 met en évidence certains des résultats.

Les améliorations dramatiques au niveau de la raffinerie ne sont pas restées inaperçues. Le 2 Juillet 1998, le grand titre des Lima News annonçait « La Raffinerie de Pétrole Sauvée ». Clark USA, une compagnie privée dans la catégorie des Fortune 500 avec des intérêts dans le raffinage et la distribution, accepta d'acheter la Raffinerie de Lima à BP pour 215 million\$ et de maintenir ses opérations de raffinage. Beaucoup de gens et d'organisations ont contribué au sauvetage de la raffinerie. Cependant, sans les améliorations dramatiques des opérations de raffinage stimulées par l'intervention de la pensée des systèmes il est peu probable que Clark, ou quelque autre acheteur que ce soit, n'aurait pas offert assez pour que la raffinerie continue ses opérations.

#### **Tableau 2-2** **Amélioration à la Raffinerie de Lima**

- Le MBTF de la pompe de la raffinerie de Lima en hausse de 12 à 58 mois (les défaillances de la pompe en baisse de plus de 640 en 1991 à 131 en 1998). Economies directes : 1,8 million \$/an.
- Le flamboiement total de l'hydrocarboné en baisse de 1,5% à 0,35%. Economies directes : 0,27\$/baril. Qualité environnementale améliorée.
- Amélioration du temps de travail de l'analyseur en ligne de 75% et on fiable à 97% et fiable, permettant une optimisation à temps réel du flux des produits. Economies : 0,10-0,12\$ /baril.
- Trente quatre records de production établis.
- Incidents de sécurité et heures perdues réduits en facteur de 4.
- Marge de liquidité améliorée à raison de 0,77\$ par baril de pétrole traité.
- Valeur nouvelle totale créée : 43 million\$ /an. Coûts totaux : 320.000\$/an. Ratio : 143 :1.
- Initiative d'apprentissage à travers tout BP en cours pour toutes les autres raffineries et usines. Plus de 2000 personnes sur les sites aux Etats Unis, Royaume Uni, Australie, Mer du Nord, Alaska, et en Europe ont participé aux ateliers et au jeu en 1998.

Source : Paul Monus, conversation privée; Monus, P. (1997) « Fabrication proactive à la Raffinerie de Pétrole de BP à Lima », présenté à la Conférence sur la Maintenance de l'Association Nationale des Raffineurs de Pétrole, 20-23 Mai 1997, New Orleans ; et Griffith, J., D. Kuenzli, et P. Monus (1998) « Fabrication Proactive : Accélérer le Pas Change les Percées en terme de Performance », Conférence sur la Maintenance du NPRA, MC-98-92.

17 MG News. 15 Septembre 1998.

Le succès du laboratoire d'apprentissage et du jeu de la maintenance illustre le but réel du processus de modélisation. Le modèle, le jeu, et l'atelier n'apprennent à personne la façon de bien maintenir une pompe ou de faire le suivi de la vibration. Du Pont, BP et les autres organisations disposaient déjà de plein d'outils et de connaissances techniques. Le jeu et le laboratoire d'apprentissage permettent plutôt aux gens de vivre les conséquences à long terme pour toute l'organisation de leurs actions, de décréter un avenir où les anciens comportements changent, et de vivre de façon à la fois émotionnelle et cognitive ce à quoi pourrait ressembler la transition vers une usine hautement performante.

L'expérience de Lima illustre la puissance d'un changement des modèles mentaux. L'équipe de BP est parvenue à réduire les flamboiements de butane à zéro, générant des économies annuelles de 1,5 million\$ et réduisant du même coup la pollution. L'effort a duré deux semaines et coûté 5000 \$, un retour sur investissement de 30.000%/an. Qu'est-ce qui les a empêché de faire ses améliorations longtemps avant ? Les membres de l'équipe connaissaient le problème et sa solution depuis 8 ans. Ils avaient déjà tout le savoir faire en ingénierie dont ils avaient besoin pour résoudre le problème et la plupart des équipements et du matériel était déjà sur place. Les seules barrières étaient les modèles mentaux à travers lesquels les employés en étaient arrivés à croire qu'ils étaient impuissants, que le problème était imposé par des forces externes qui échappaient à leur contrôle, et qu'un nombre réduit de gens ne pourraient jamais faire la différence.

Ces modèles mentaux profondément ancrés ont changé de quatre manières principales. Il fallait changer la croyance que le problème était quelque part de « notre matériel est mauvais et nous n'y pouvons rien » à « notre matériel ne marche pas bien à cause de nos propres politiques passées. Si nous changeons notre comportement, les équipements répondront à ce changement ». L'accent sur la correction des défauts à travers la réparation devait changer en un accent sur la prévention et l'élimination des défauts. L'accent sur la minimisation des coûts de maintenance devait changer en maximisation de l'effort d'ensemble de la performance de l'organisation. Et il leur fallait réaliser qu'échapper au piège de la maintenance réactive impliquait nécessairement qu'ils allaient faire face au pire avant le mieux.

Le modèle formel était fondamental, puisqu'il a conduit aux aperçus initiaux de la dynamique de l'amélioration du processus et des effets synergiques des grandes politiques de levier. Le modèle a aussi permis à l'équipe de modélisation de développer le jeu et d'aider à le rendre réaliste. En fin de compte, le succès de la réalisation exigeait que l'équipe de modélisation enracine ses aperçus dans un environnement d'apprentissage qui impliquait la participation active des gens sur les lignes de front, qui permettait aux gens de découvrir ces aperçus par eux-mêmes, et qui s'adressait non seulement à leurs connaissances, mais aussi à leurs sentiments.

## **2.5 Resume : Principes De L'utilisation Avec Succes De La Dynamique Des Systemes**

Bien que les projets décrits ci-dessus diffèrent sous plusieurs angles, ils illustrent tous certains principes pour l'élaboration et l'exécution des modèles de la dynamique des systèmes (voir le chapitre 3 ; voir aussi Forrester 1961 ; Roberts 1977/1978 ; et Morecroft et Sterman 1994).

1. Elaborez un modèle pour résoudre un problème spécifique, non pour modéliser le système. Le modèle doit avoir un but précis et ce but doit être de résoudre le problème qui préoccupe le client. Les modeleurs doivent exclure tous les facteurs



qui ne sont pas pertinents par rapport au problème pour s'assurer que l'envergure du projet est faisable et que les résultats tomberont à temps. Le but est d'améliorer la performance du système telle que définie par le client. Se focaliser sur les résultats.

2. La modélisation doit être intégrée à un projet dès le départ. L'utilité du processus de modélisation commence tôt, à la phase de définition du problème. Le processus de modélisation aide à focaliser le diagnostic sur la structure du système plutôt que de rejeter le problème sur les décideurs au niveau de cette structure.
3. Soyez sceptiques quant à l'utilité de la modélisation et imposez la discussion sur « Pourquoi avons-nous besoin de la modélisation » au début du projet. Il y a beaucoup de problèmes pour lesquels la dynamique des systèmes n'est pas utile. Réfléchissez soigneusement pour savoir si la dynamique des systèmes est la technique appropriée pour résoudre le problème. Les modelleurs doivent accueillir avec joie les questions difficiles des clients sur la façon dont le processus marche et la façon dont il peut les aider à résoudre leur problème. Plus tôt ces questions seront débattues, mieux ça sera.
4. La dynamique des systèmes n'est pas un système à part. Utilisez d'autres outils et méthodes chaque fois que c'est approprié. La plupart des projets de modélisation font partie d'un effort plus grand impliquant des analyses stratégiques et opérationnelles traditionnelles, y compris les évaluations de performance, les travaux statistiques, les études de marché, etc.. La modélisation efficace repose sur une banque de données solide et sur une compréhension des problèmes. La modélisation réussit le plus s'il agit en tant que complément d'autres outils, non pas en tant que substitut.
5. Focalisez-vous sur l'exécution dès le début du projet. L'exécution doit commencer le premier jour du projet. Demandez-vous constamment, Comment le modèle va-t-il aider le client à prendre des décisions ? Utilisez le modèle pour fixer les priorités et déterminer la séquence de la politique d'exécution. Utilisez le modèle pour répondre à la question, Comment arriverons-nous là bas à partir d'ici ? Considérez soigneusement les problèmes du monde réel concernés par l'utilisation des différents leviers de politique. Quantifier tous les coûts et avantages des politiques, pas seulement ceux déjà rapportés par les systèmes de comptabilité existants.
6. La modélisation marche au mieux en tant que processus itératif de recherche conjointe entre le client et le consultant. La modélisation est un processus de découverte. Le but est d'atteindre une nouvelle compréhension de la façon dont le problème survient et d'utiliser ensuite cette compréhension pour concevoir de grandes politiques de levier pour l'amélioration. La modélisation ne doit pas être utilisée comme un outil de plaidoyer. Ne renforcez pas l'opinion de départ du client sur ce qui doit être fait dans un modèle. Utilisez des ateliers où le client peut tester le modèle par lui-même, à temps réel.
7. Evitez la modélisation de boîte noire. Les modèles élaborés sans le client ne conduiront jamais au changement des modèles mentaux profondément enracinés et par conséquent ne changeront pas le comportement du client. Impliquez le client aussi tôt et aussi profondément que possible. Montrez-leur le modèle. Encouragez-les à faire des suggestions et à faire leurs propres tests et à critiquer le Modèle. Travaillez avec eux pour résoudre leurs critiques à leur satisfaction.

8. La validation est un processus continu de test et de renforcement de la confiance au modèle. Les modèles ne sont pas validés après leur achèvement par un test tel que leur capacité à correspondre aux données historiques. Les clients (et les modelleurs) renforcent la confiance à l'utilité d'un modèle progressivement, en opposant constamment le modèle aux données et à l'opinion des experts- leurs propres experts et les experts des autres. A travers ce processus le modèle et l'opinion des experts changeront et s'approfondiront. Recherchez les opportunités pour remettre en cause la capacité du modèle à dupliquer différentes expériences historiques.
9. Mettez en marche un modèle préliminaire dès que possible. Ajoutez les détails seulement quand c'est nécessaire. Développez un modèle de simulation qui marche aussi tôt que possible. Ne cherchez pas à élaborer un modèle conceptuel exhaustif avant le développement d'un modèle de simulation. Les modèles conceptuels sont seulement des hypothèses et doivent être testés. La formalisation et la simulation relèvent souvent les imperfections des cartes conceptuelles et conduisent à une compréhension améliorée. Les résultats des expérimentations de simulation informent la compréhension conceptuelle et aident à renforcer la confiance aux résultats. Les premiers résultats donnent une valeur immédiate aux clients et justifient un investissement continu de leur temps.
10. Une large limitation du modèle est plus importante qu'un grand nombre de détails. Les modèles doivent trouver un équilibre entre une représentation utile, opérationnelle des structures et des leviers de politique disponibles pour le client en même temps qu'ils captent les réactions généralement prises en compte dans ses modèles mentaux. En général, la dynamique d'un système émerge des interactions entre les composantes de ce système- capter ces réactions est plus important que beaucoup de détails dans la représentation des composantes elles-mêmes.
11. Utilisez des experts en modélisation, non pas des novices. Bien que le logiciel disponible pour la modélisation peut être facilement maîtrisé par un élève du lycée ou un PDG, la modélisation n'est pas la programmation par ordinateur. Vous ne pouvez pas élaborer un diagramme qualitatif et le donner ensuite à un programmeur pour codage dans un modèle de simulation. La modélisation requiert une approche disciplinée et une compréhension des affaires, des compétences développées à travers les études et l'expérience. Obtenez l'assistance des experts dont vous avez besoin. Utilisez le projet comme une opportunité de développer les compétences des autres membres de l'équipe et de l'organisation du client.
12. L'exécution ne prend pas fin avec un seul projet. Dans tous les trois cas le travail de modélisation a continué à avoir un impact longtemps après la fin du projet initial. Les modèles et les simulateurs de vol de gestion ont été appliqués à des problèmes similaires dans des cadres différents. Les modelisateurs ont développé une expertise qu'ils ont appliquée à des problèmes relatifs et les clients ont occupé de nouveaux postes et changé d'organisation, amenant les aperçus qu'ils ont acquis, quelques fois une nouvelle forme de pensée avec eux. L'exécution est un processus à long terme de changement personnel, organisationnel et social.

# 3

## Le Processus de Modélisation

*Peut-être la faute [du mauvais résultat d'exécution des modèles] se trouve dans les origines de la modélisation directoriale –la traduction des méthodes et principes des sciences physiques en recherches sur les opérations en temps de guerre... Si les théories, données, et analyses conduisent aux preuves et nouvelles connaissances en science, des processus similaires ne devraient-ils pas amener des changements dans les organisations ? La réponse est évidente- NON. Les changements organisationnels (ou les décisions et politiques) ne découlent pas instantanément de la preuve, de la logique déductive, et de l'optimisation mathématique.*

Edward B. Roberts 1

Dans le chapitre 1 le concept d'un monde virtuel a été introduit comme moyen d'accélérer le processus d'apprentissage, et le chapitre 2 a démontré la façon dont les modèles deviennent des mondes virtuels pour aider à résoudre les problèmes dans trois situations différentes. Comment des (modèles) de monde virtuel peuvent-ils être utilisés avec le maximum d'efficacité. Comment des mondes virtuels utiles peuvent-ils être créés ? La modélisation a lieu dans le contexte de la résolution des problèmes du monde réel, avec toutes ses pourritures, ambiguïtés, pressions de temps, politiques, et conflits inter-personnes. Le but est de résoudre un problème, pas seulement d'acquiescer un aperçu (même si un aperçu du problème est nécessaire en vue de concevoir des politiques efficaces). La modélisation, dans le cadre du processus d'apprentissage, est itérative, un processus continu de formulation d'hypothèses, de test, et de révision, des modèles formels et mentaux à la fois. Les expérimentations menées dans le monde virtuel informent la conception et l'exécution des expérimentations dans le monde réel ; l'expérience dans le monde réel entraîne ensuite des changements et améliorations dans le monde virtuel et dans les modèles mentaux des participants. Ce chapitre présente le but de la modélisation, décrit le système de modélisation de la dynamique des systèmes, le rôle du client, et les responsabilités professionnelles et éthiques du modélisateur.

Roberts, E. (1977), « Stratégies d'une exécution efficace des modèles de société complexes », Interfaces 7(5) ; chapitre 4 dans Roberts (1978) aussi. Le document demeure une déclaration sommaire et toujours pertinente sur le besoin d'exécuter le point d'intérêt de la mise en œuvre dès le début de tous projets de modélisation.

### 3.1 Le But De La Modelisation : Les Responsables Comme Concepteurs De L'organisation

Jay Forrester demande souvent, Quelles sont les personnes les plus importantes dans l'exploitation sécurisée d'un avion ? La plupart des gens répondent, Les pilotes. En fait, les gens les plus importants sont les concepteurs. Avoir des pilotes compétents, bien formés est d'une importance critique, mais la conception d'un avion stable, robuste sous conditions extrêmes, et que des pilotes ordinaires peuvent piloter en toute sécurité même sous stress, fatigués, ou dans des conditions qui ne leur sont pas familières est de loin plus importante. Dans le contexte des systèmes sociaux et d'affaires, les directeurs jouent les deux rôles. Ils sont le pilote, prenant des décisions (qui recruter, quels prix fixer, quand lancer le nouveau

produit) et ils sont le concepteur, donnant une forme aux structures, stratégies, et règles de décision organisationnelles qui influencent le processus de prise de décision. Le rôle de conception est le plus important mais reçoit généralement le moins d'attention. Trop de responsables, surtout les responsables de la direction, passent beaucoup trop de temps à jouer les pilotes- prenant des décisions, retirant le contrôle aux subordonnés- au lieu de créer une structure organisationnelle conforme à leurs visions et à leurs valeurs et qui peut être bien gérée par des gens ordinaires. (Voir Forrester 1965).

De nos jours, concevoir un avion est impossible sans la modélisation et la simulation. Toutefois, les responsables qui cherchent à rehausser leurs compétences en conception organisationnelle, continuent à concevoir à travers les essais et les erreurs, les anecdotes, et l'imitation des autres bien que la complexité de leurs organisations rivalise avec celle d'un avion. Le monde virtuel offre un outil important aux responsables pour la gestion et surtout la conception de leurs organisations.

Il y a clairement un rôle pour les modèles qui aident les responsables à mieux piloter leurs organisations, et la dynamique des systèmes est souvent utile à cette fin. Mais la vraie valeur du processus apparaît quand les modèles sont utilisés pour appuyer la re-conception organisationnelle. Dans la Dynamique Industrielle, Forrester en appelle au courage dans la sélection des problèmes, affirmant, « Résoudre des problèmes de moindre envergure n'apporte qu'une satisfaction limitée... Le but doit être de trouver des politiques de gestion et des structures organisationnelles qui engendrent des réussites plus grandes ». Focalisez votre travail de modélisation sur les problèmes importants, sur les problèmes pour lesquels votre travail peut avoir un impact positif durable, sur les problèmes qui vous tiennent le plus à cœur.

### **3.2 Le Client Et Le Modelisateur**

La modélisation ne se déroule pas dans une isolation splendide. Elle est enracinée dans un contexte social et organisationnel. Même avant le début du processus de modélisation proprement dit, le modelisateur doit accéder à l'organisation et identifier le client. Le client n'est pas la personne qui vous amène dans une organisation ou qui soutient votre travail, ni même la personne qui paie pour l'étude de modélisation, même si ça peut aider d'avoir des relations, des défenseurs et de l'argent. Vos clients sont les gens que vous devez influencer pour que votre travail ait un impact. Ce sont ces gens dont le comportement doit changer pour que le problème soit résolu. Votre client peut être un PDG ou un opérateur de machine à l'usine. Les clients peuvent être des individus, des groupes, ou des communautés entières. Le client pour une étude de modélisation peut être vos collègues de l'université, le grand public, ou même vous. Dans les discussions à venir, je m'appesantirai sur les projets de modélisation menés en faveur des organisations. Toutefois, le processus est le même pour ces autres contextes aussi.

Pour être efficace le processus de modélisation doit se focaliser sur les besoins du client. Les clients pour un projet de modélisation sont occupés. Ils sont impliqués dans les politiques au sein de l'organisation. Ils ont une carrière à défendre. Leur préoccupation est de résoudre un problème et d'agir dans le monde réel. Ils ont très peu de considération pour l'élégance de vos théories ou l'ingéniosité de votre modèle. La modélisation est faite pour aider le client, pas pour profiter au modelisateur. Le contexte et les problèmes du monde réel du client déterminent la nature du modèle, et le processus de modélisation doit être conforme aux compétences, capacités et objectifs du client. Le but est d'aider les clients à résoudre leurs problèmes. Si les clients sentent que votre modèle ne répond pas à leurs inquiétudes ou s'ils

perdent confiance à votre modèle, vous aurez peu d'impact. Focalisez votre travail de modélisation sur les problèmes qui empêchent le client de dormir.

Le contexte politique de la modélisation et le besoin de se focaliser sur le problème du client ne signifient pas que les modélisateurs doivent être des mercenaires prêts à faire tout ce que le client veut. Les modélisateurs ne doivent pas automatiquement accéder aux demandes du client d'inclure plus de détails ou de se focaliser sur un ensemble de problèmes tout en ignorant d'autres, juste pour maintenir le client à bord. Un bon processus de modélisation remet en cause la conception du problème du client. Les modélisateurs ont la responsabilité de demander à leurs clients de justifier leurs opinions, de supporter leurs points de vue avec des données, et de prendre en compte de nouveaux points de vue. Si le client vous demande de faire quelque chose que vous trouvez inutile ou mal inspiré, vous devez travailler avec lui pour résoudre le problème.

Malheureusement, beaucoup trop de clients ne sont pas intéressés par l'apprentissage mais s'intéressent à l'utilisation du modèle pour appuyer des conclusions qu'ils ont déjà atteintes ou comme instruments pour monter en puissance au sein de leurs organisations. Il est triste que beaucoup trop de consultants et de modélisateurs sont trop désireux de se laisser faire. En tant que modélisateur vous avez une responsabilité éthique de faire votre travail avec rigueur et intégrité. Vous devez être prêt à laisser le processus de modélisation changer votre point de vue. Vous devez « dire la vérité au pouvoir », dire au client que ses croyances les plus chères sont fausses, si le processus de modélisation le révèle, même si vous devez être renvoyé pour cela. Si votre client vous pousse à produire un résultat qu'il avait choisi d'avance ou qui n'est pas soutenu par l'analyse, ne cédez pas. Si le client ne fait pas montre d'une ouverture d'esprit, si vous ne pouvez pas le convaincre d'utiliser la modélisation honnêtement, vous devez arrêter. Trouvez-vous un meilleur client.<sup>2</sup>

### **3.3 Les Etapes Du Processus De Modelisation**

Dans la pratique, en tant que modélisateur vous êtes d'abord envoyé au sein d'une organisation par une relation qui pense que vous ou votre outil de modélisation peut aider. Votre première tâche consiste à découvrir le vrai problème et le vrai client. Votre contact initial peut ne pas être le client, mais agir seulement comme le gardien qui peut vous présenter au client. Au cours du projet de modélisation, vous pouvez vous rendre compte que le groupe de clients s'élargit ou change. Supposez que vous avez négocié avec succès votre entrée dans l'organisation et que vous avez identifiés les clients (initiaux). Comment vous y prendre pour développer un modèle pouvant les aider ?<sup>3</sup>

**Tableau 3-1**

#### **Etapes du processus de modélisation**

##### **1. Définition du Problème (Sélection des frontières)**

- Sélection du thème : Quel est le problème ? Pourquoi est-il le problème ?
- Variables clés : Quels variables et concepts clés devons-nous considérer ?
- Horizon temps : Jusqu'où dans le futur devons-nous considérer ? Jusqu'où dans le passé se trouvent les racines du problème ?
- Définition de problème de la dynamique (modes de référence) : Quel est le comportement historique des concepts et variables clés ? Quel pourrait-être leur comportement à l'avenir ?

## **2. Formulation des Théories Dynamiques**

- Développement de la théorie initiale : Quelles sont les théories courantes du comportement problématique ?
- Accent endogène : Formuler une théorie dynamique qui explique la dynamique comme conséquences endogènes de la structure de réaction.
- Elaboration de carte : Elaborer des cartes de structure causale sur la base des théories initiales, des variables clés, des modes de références, et d'autres données disponibles, en utilisant des outils tels que
  - Les diagrammes des frontières du modèle,
  - Les diagrammes de sous systèmes,
  - Les diagrammes de boucle causale,
  - Les cartes de stock et de flux,
  - Les diagrammes de structure de politique,
  - D'autres outils de facilitation.

## **3. Formulation d'un Modèle de Simulation**

- Spécification de la structure, des règles de décision.
- Estimation des paramètres, des relations comportementales, et des conditions initiales.
- Test de conformité au but et aux frontières.

## **4. Test**

- Comparaison aux modes de référence : le modèle reproduit-il le comportement du problème de façon adéquate pour le but que vous recherchez ?
- Robustesse sous conditions extrêmes : le modèle se comporte-t-il de façon réaliste sous le stress des conditions extrêmes ?
- Sensitivité : comment le modèle se comporte-t-il au regard des incertitudes des paramètres, des conditions initiales, de ses propres frontières, et de l'agrégation ?
- ... Beaucoup d'autres tests.

## **5. Conception et Evaluation de Politique**

- Spécification de scénario : Quelles conditions environnementales pourraient être soulevées ?
- Conception de politique : quelles nouvelles règles de décision, stratégies et structures pourraient être essayées dans le monde réel ? Comment peuvent-elles être représentées dans le modèle ?
- Analyse « Et si... » : quels sont les effets des politiques ?
- Analyse de sensibilité : jusqu'à quel point les recommandations de politique des différents scénarios et au regard des incertitudes peuvent-elles être robustes ?
- Interactions de politiques : les politiques agissent-elles entre elles ? Y a-t-il des synergies ou des réactions compensatoires ?

Il n'y a pas de recette de livre de cuisine pour la modélisation avec succès, pas de procédure qui vous garantisse un modèle utile. La modélisation est par nature créative. Les modélisateurs ont leurs propres styles et approches. Pourtant les modélisateurs qui réussissent le mieux suivent un processus discipliné qui implique les activités suivantes : (1) articuler le problème à aborder ; (2) formuler une hypothèse ou théorie dynamique sur les causes du problème ; (3) formuler un modèle de simulation pour tester les théories dynamiques ; (4)

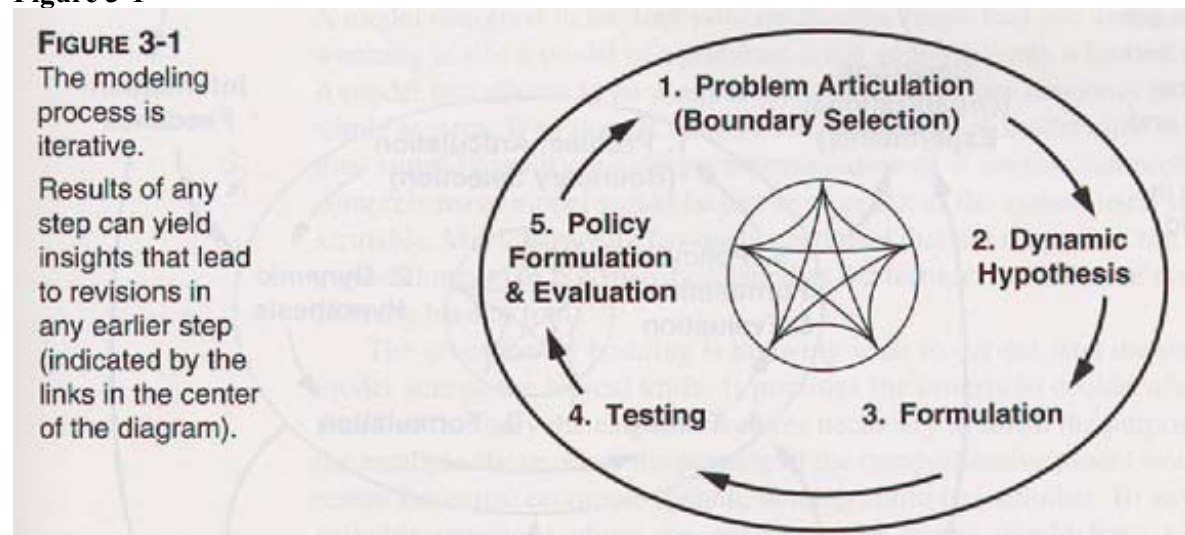
tester le modèle jusqu'à ce que vous soyez satisfait qu'il convient à votre objectif ; et (5) concevoir et évaluer des politiques d'amélioration. Le tableau 3-1 donne la liste de ces étapes avec certaines des questions abordées par chaque étape et les outils principaux utilisés à chaque étape (voir aussi Randers 1980).

3 Il existe une grande documentation sur les méthodes de changement organisationnel planifié et les interventions de groupe. Voir en particulier Argyris et Schon (1996), Beckard et Harris (1987), Dyer (1995), Cichael (1997) et Schien (1987, 1988).

### 3.4 La Modelisation Est Iterative

Avant de discuter de chacune de ces étapes plus en détails, il est important de placer le processus de la modélisation dans son contexte comportant les activités en cours des personnes qui se trouvent dans le système. La modélisation est un processus de réaction et non une séquence linéaire d'étapes. Les modèles passent par un processus d'itération constante, de questionnement continu, de tests et de raffinement. La figure 3-1 remanie le processus de modélisation présenté dans le tableau 3-1 plus clairement comme un cycle itératif. L'objectif initial dicte la limite et l'ampleur de l'effort de modélisation, mais ce qu'on apprend dans le processus de modélisation peut réagir pour modifier notre compréhension de base du problème et l'objectif de notre effort. La répétition ou l'itération peut survenir à partir de n'importe quelle étape jusqu'à tout autre étape (est indiqué par les interconnexions au centre du diagramme) Dans n'importe quel projet de modélisation l'on fera les itérations le long de ces étapes.

**Figure 3-1**



4 Homer (1996) donne une démonstration excellente de la valeur de l'itération et de la rigueur dans les dynamiques des systèmes, pas seulement dans la recherche académique mais surtout dans le travail de consultation avec une diversité d'exemples.

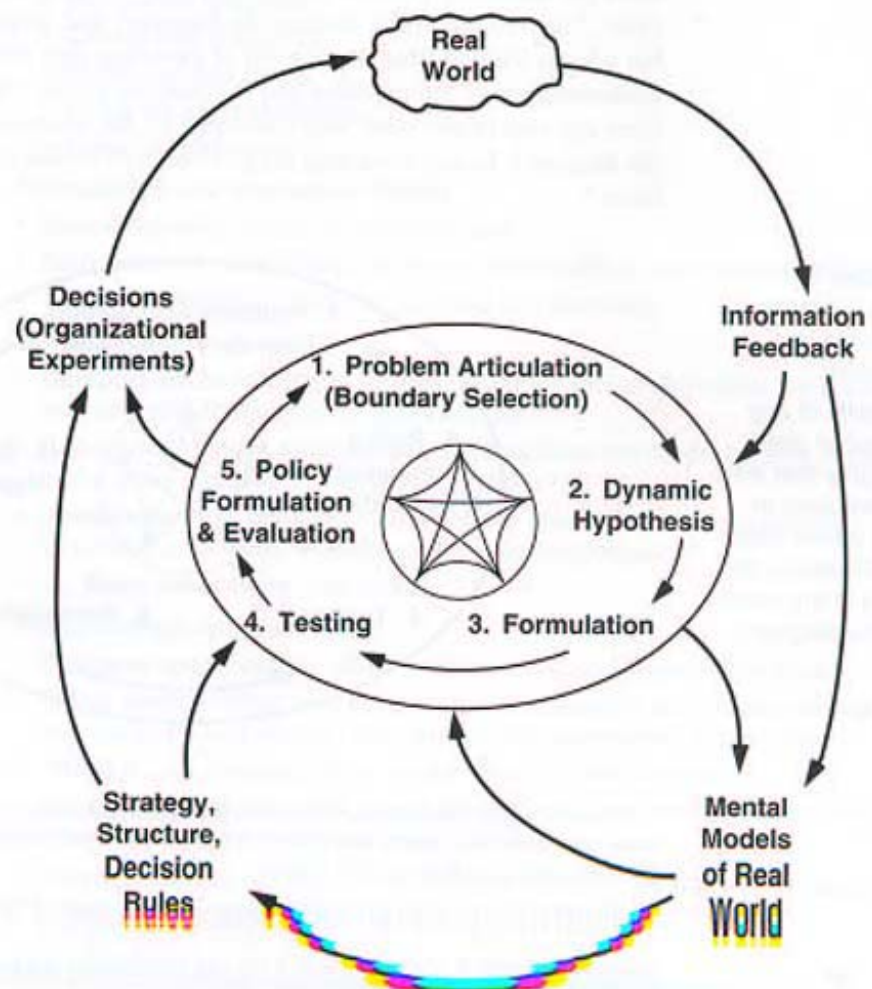
Mieux encore, la modélisation est ancrée dans le grand cycle de l'apprentissage et de l'action ayant constamment lieu dans les organisations (et décrites dans le chapitre 1). Les pilotes

entrent dans un simulateur de vols d'avions pour apprendre à piloter l'avion plus rapidement, efficacement et avec plus de sécurité, puis ils mettent en pratiques ces connaissances sur l'avion réel. Ils répercutent ce qu'ils apprennent du vol en situation réelle aux concepteurs de simulation, pour les aider à améliorer les simulateurs continuellement. Ce que les pilotes et les concepteurs apprennent dans le simulateur est utilisé dans le monde réel. Et ce qu'ils apprennent dans le monde réel est aussi utilisé pour changer et améliorer le monde virtuel du simulateur. Ainsi c'est pareil avec la gestion de simulateur de vols et les modèles de dynamiques de systèmes. La Figure 3-2 montre le processus de modélisation ancré dans les réactions à boucles uniques et doubles d'apprentissage abordées dans le chapitre I. Les modèles de simulation sont informés et enrichis par nos modèles mentaux et par l'information glanée à partir du monde réel. Les stratégies, structures et règles de décisions utilisées dans une situation réelle peuvent être représentées et testées dans le monde virtuel du modèle. Les expérimentations et les tests menés dans le modèle réagissent pour altérer nos modèles mentaux et conduisent à la conception de nouvelles stratégies, de nouvelles structures et de nouvelles règles de décisions. Ces nouvelles politiques sont alors mises en œuvre dans le monde réel, et la réaction sur leurs effets conduit à de nouvelles idées et à d'autres améliorations à la fois dans nos modèles formels et mentaux. La modélisation n'est pas une activité ponctuelle qui produit La Réponse, mais un processus continu de cycles continus entre le monde virtuel du modèle et le monde réel de l'action.

**Figure 3-2**

**FIGURE 3-2**

Modeling is embedded in the dynamics of the system. Effective modeling involves constant iteration between experiments and learning in the virtual world and experiments and learning in the real world.





## **3.5. REVUE DU PROCESSUS DE MODELISATION**

### **3.5.1 Definition Du Probleme : L' Importance Du But**

L'étape la plus importante dans la modélisation est l'expression ou la définition du problème. Quel est le problème qui préoccupe le plus les clients. Quel problème tentent-ils de résoudre présentement ? Quel est le vrai problème, pas seulement le symptôme de sa difficulté ? Quel est le but du modèle ?

Un objectif clair est l'unique ingrédient le plus important pour une étude de modélisation réussie. En effet, un modèle avec un objectif clair peut toujours être trompeur, lourd et difficile à comprendre. Mais un objectif clairement exprimé permet aux clients de poser des questions qui révèlent si un modèle est utile dans la résolution du problème qu'il cherche à résoudre.

Méfiez vous de l'analyste qui propose de modéliser tout une société ou système social plus tôt qu'un problème. Chaque modèle est une représentation d'un système – un groupe d'éléments fonctionnellement reliés entre eux formant un ensemble complexe. Mais pour qu'un modèle soit utile, il doit s'attaquer à un problème spécifique et doit simplifier plutôt que de tenter de présenter un reflet de tout un système en détail.

Quelle est la différence ? Un modèle conçu pour permettre de comprendre comment stabiliser le cycle des affaires est un modèle de problème. Cela touche à une question spécifique de politique. Un modèle destiné à explorer les politiques visant à ralentir l'utilisation des énergies fossiles et à atténuer le réchauffement climatique qui est également un modèle de problème; il s'attaque aussi à un ensemble limité de questions. Un modèle qui prétend être une représentation de toute l'économie qui est un modèle de tout un système. Pourquoi est ce important ? l'utilité des modèles se situe dans le fait qu'il simplifie la réalité créant une représentation que l'on comprend. Un modèle véritablement complet sera tout aussi complexe que le système lui-même et tout aussi énigmatique. Von Clausewitz a averti que la carte n'est pas le territoire. C'est une bonne chose, ce n'est pas : Une carte aussi détaillée qu'un territoire ne serait pas utile ( elle sera tout aussi difficile à plier).

L'art de la modélisation consiste à savoir ce qu'il faut couper et le but ou l'objet du modèle est le couteau logique. Celui-ci offre les critères servant à décider ce qui doit être ignoré pour ne laisser que les fonctions essentielles nécessaires à l'application de l'objet. Dans l'exemple donné ci-haut, puisque le but du modèle complet serait de représenter tout le système économique, rien ne pourra être exclu. Pour répondre à toutes les questions imaginables sur l'économie, le modèle devra inclure toute une gamme de variables. En raison de l'ampleur de sa taille et de ses frontières le modèle ne pourrait jamais être achevé. Mais si il l'était, les données requises pour s'en servir ne pourraient jamais être compilées. Si elles l'étaient les hypothèses qui sous-tendent le modèle ne pourraient jamais être examinées ni testées. Si elles l'étaient, les concepteurs du modèle ne pourraient jamais comprendre son comportement et la confiance des clients pour ce modèle dépendrait de l'autorité du modélisateur et d'autres raisons non scientifiques. Mihailo Mesarovic, le concepteur des premières simulations mondiales a vu l'impossibilité de la construction/conception de modèles de systèmes lorsqu'il dit, " quelque soit l'énormité des ressources dont on dispose, on peut envisager un modèle suffisamment complexe pour que les ressources disponibles soient insuffisantes pour la tâche à accomplir" (Meadows, Richardson, and Bruckmann 1982, p 197).

Un modèle conçu pour un but spécifique tel que la compréhension du cycle des affaires ou le réchauffement climatique de la planète sera plus petit dans la mesure il se limitera aux facteurs que l'on croit pertinents pour le sujet en question. Par exemple, le modèle du cycle des affaires ne devra pas nécessairement inclure des tendances à long terme de la croissance de la population, de l'épuisement des ressources ou du changement climatique. Le modèle sur le réchauffement de la planète pourrait exclure les dynamiques à court terme relatifs aux taux d'intérêt, l'emploi et les stocks. Les modèles qui en résultent pourraient être suffisamment simples pour permettre l'examen de leurs hypothèses. La relation entre ces hypothèses et les théories les plus importantes portant sur le cycle des affaires, le changement climatique pourrait être appréciée et évaluée pour déterminer l'utilité des modèles par rapport à leurs buts visés. Bien sur que même les modèles dont les buts sont bien définis peuvent s'avérer trop large. Mais sans but clairement défini il n'y aura aucune base sur laquelle se fonder pour dire " nous n'avons pas besoin d'inclure ceci ou cela" lorsque un membre de l'équipe du client fait une suggestion. En bref : il faut toujours modéliser le problème. Ne pas modéliser un système.

Généralement, le modélisateur développe les premiers caractéristiques du problème à travers des discussions avec l'équipe clients et complété par des recherches documentaires, la collecte des données, les interviews ainsi que l'observation et la participation directes. Il y a plusieurs méthodes pouvant travailler avec un groupe pour montrer l'information nécessaire pour la définition dynamique du problème tout en gardant la conversation fortement concentrée sur les clients et leur problème. Deux des processus les plus utiles consistent à établir des modes de références et à fixer clairement les délais dans le temps.

## **Modes de Références**

Les modélisateurs de la dynamique des systèmes cherchent à définir le problème de manière dynamique, c'est à dire, dans le cadre d'une tendance des comportements, qui se déroule sur le temps ce qui montre comment le problème s'est posé et comment il pourra évoluer dans le futur. Vous devez développer un mode de référence, c'est à dire un ensemble des graphiques et autres données descriptives montrant l'évolution du problème dans le temps. Les modes de référence ( ainsi nommés car vous en faites référence tout le long du processus de modélisation) vous aident et vos clients à sortir de la vision du monde à court terme et basé sur les événements que tant de personnes ont. Pour ce faire, vous et vos clients doivent identifier le délai ou la période de temps et définir ces variables et concepts que vous considérer importants pour la compréhension du problème et la conception des politiques pour le résoudre.

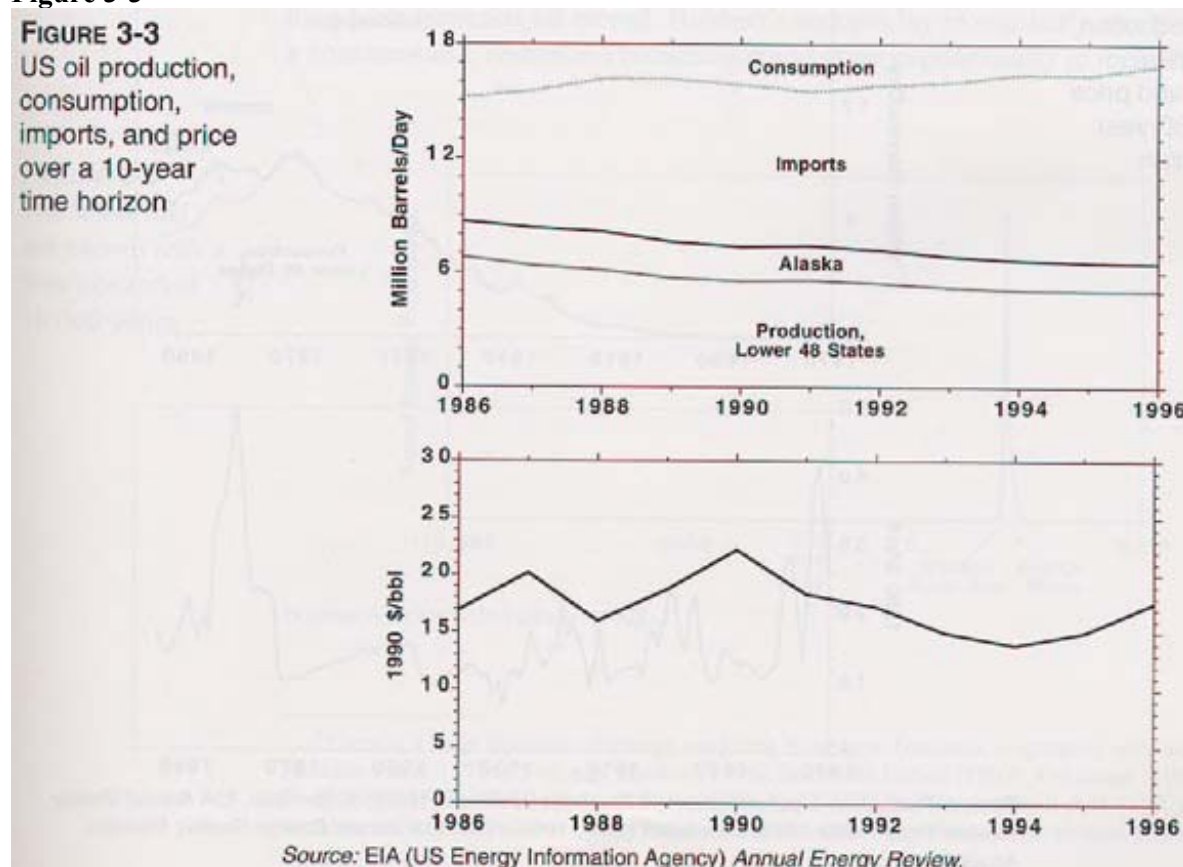
## **Période de temps**

La période de temps devra s'étendre suffisamment dans l'histoire pour montrer comment le problème a pris naissance et devra décrire les symptômes de celui-ci. Elle devra toutefois, s'étendre dans le futur pour englober les effets indirects et retardés des politiques potentielles. La plupart des personnes sous-estiment de manière spectaculaire la longueur des retards et des périodes de temps et sélectionnent des périodes de temps trop courtes. Une déficience majeure de modèles mentaux est notre tendance de penser aux causes et effets comme ayant un caractère local et immédiat. Mais dans les systèmes complexes et dynamiques, les cause et effets sont distants dans le temps et l'espace. La plupart des effets non prévus des décisions conduisant à des résistances aux politiques comportent des réactions avec de grands retards, très en retrait par rapport au point de décisions ou au symptôme du problème. Travaillez avec

vos clients pour réfléchir aux réactions possibles aux politiques et le temps que ce processus prend pour accroître la période de temps encore plus. Une période de temps est un antidote critique à la vision axée sur les événements qui réduit notre capacité à identifier des modèles de comportement et les structures de réaction qui les génèrent.

Le choix de la période de temps influence considérablement votre perception du problème. La figure 3-3 montre la production, la consommation et les importations de pétrole aux Etats unis de 1986 à 1996. La période de temps historique est de 10 ans ce qui représente une longue période par rapport aux discussions sur la politique énergétique (les chocs pétroliers des années 1970 sont considérés comme appartenant au passé dans la plupart des débats qui ont cours aujourd'hui). Les graphiques montrent le déclin graduel de la production et la hausse progressive de la consommation et donc la progression lente des importations. Les prix fluctuent selon une bande étroite se situant entre 14\$ et 23 \$ le baril, son plus bas niveau depuis la crise pétrolière de 1973 ( bien que les prix aient augmenté pour atteindre 40\$ le baril après l'invasion du Koweït par l'Irak, pour retomber aussitôt après). Le système d'énergie semble relativement stable ; il y a peu de preuves indiquant l'existence d'un problème à long terme.

**Figure 3-3**

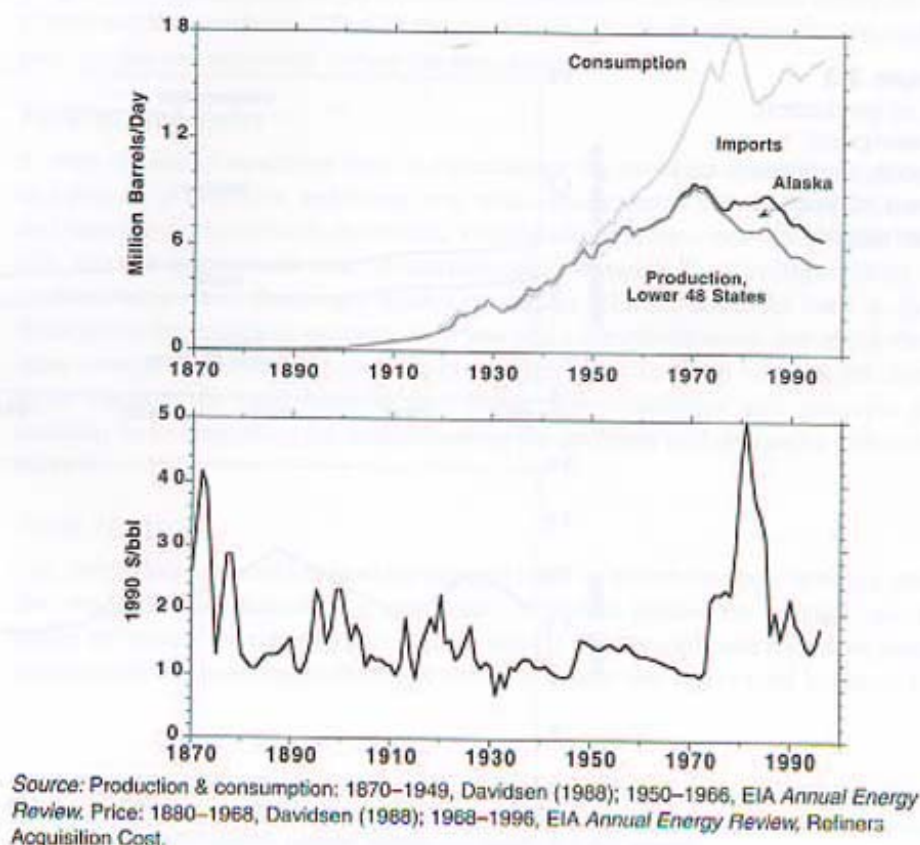


A présent, analysez la figure 3-4, qui montre les mêmes variables presque au moment du début de l'ère de l'exploitation pétrolière (l'industrie pétrolière a véritablement démarré en 1859 par le célèbre puits du colonel Drake à Titusville, Pennsylvanie). L'impression est totalement différente. L'histoire de l'industrie pétrolière aux Etats-Unis en deux périodes. De 1920 à 1973 la consommation a augmenté de manière exponentielle à un taux moyen de 4,3% l'an. La production a presque suivi le rythme de la consommation alors que les techniques de exploration et de forages ont plus que compensé l'épuisement. A partir des 1950 les

importations ont progressé légèrement, stimulés par la disponibilité du pétrole étranger moins cher. Il y a eu des fluctuations spectaculaires suivant une certaine tendance de baisse avec le développement de la technologie. Tout cela a changé en 1970. En 1970, la production nationale de pétrole a atteint son niveau le plus élevé. Dès lors, le prix a chuté malgré les explorations qui ont été stimulées par les prix les plus élevés des années 1970 et le début des années 1980. La production américaine dans les 48 états et dans la zone offshore en 1996 se situait à 54% de son niveau le plus élevé. Mais l'ajout de Prudhoe Bay et de trans Alaska pipeline n'ont pu arrêter la chute, et la production de l'Alaska a atteint son niveau le plus élevé en 1988. Les prix élevés après le choc des années 1970, ajoutés aux récessions les plus aiguës depuis les années de la Crise Economique ont contribué à réduire la croissance de la consommation. Néanmoins les importations ont pu atteindre 61% de la consommation totale de pétrole en 1996. En changeant la période de temps on change complètement l'appréciation du problème. Si l'on analyse du point de vue d'une période de temps conforme à la vie de la ressource, il s'avère que le problème du pétrole n'a pas été résolu dans les années 1980 mais qu'il n'a cessé de s'aggraver.

**Figure 3-4**

**FIGURE 3-4**  
US oil production,  
consumption,  
imports, and price  
over a 130-year  
time horizon

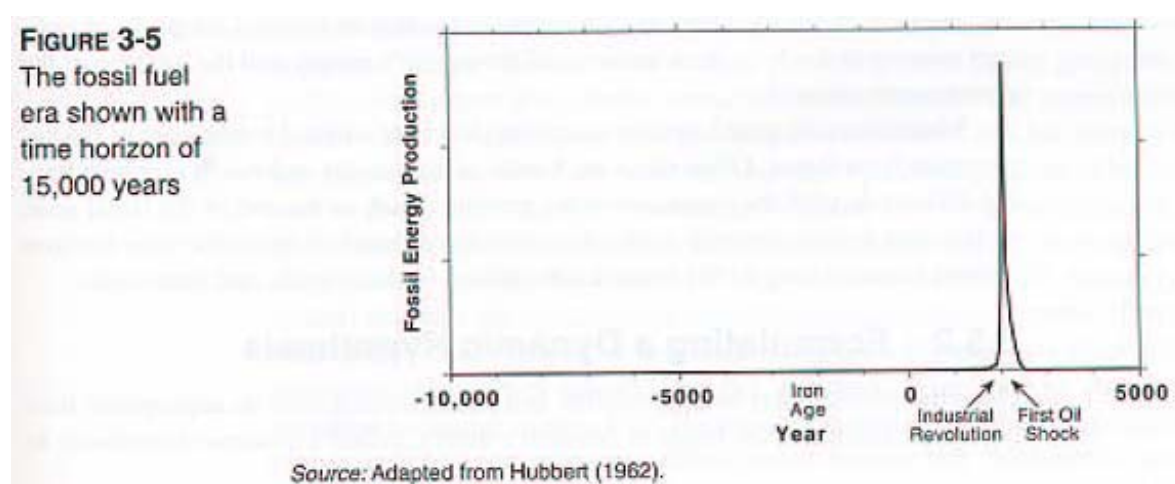


Le pétrole est un produit fini non renouvelable. Aux Etats- Unis , l'épuisement des ressources a commencé à dominer les taux de production dans les années 1960 ce qui a conduit à un déclin inévitable de la production à partir de 1970. Les Etats Unis sont le pays le plus exploré et celui comportant le plus grand nombre de forages. La grande réussite enregistrée par les premiers forages d'exploration suggère qu'il reste peu de pétrole à découvrir. En conséquence, les importations continuent à augmenter ce qui conduit à une dépendance croissante du pétrole en provenance de la région peu stable du Golfe Persique. D'où, on peut prévoir, un pouvoir économique et politique croissant en faveur des pays exportateurs et en

conséquence un déclin du pouvoir des USA se traduisant en fin de compte par des prix élevés à la pompe ou un gonflement du budget de la défense.

L'industrie du pétrole illustre les dangers qu'il y a à prendre une période de temps ou un délai trop court pour la prise en compte des dynamiques importantes ainsi que les réactions qui les suscitent. Bien sur que l'on peut également aller trop loin dans le sens contraire. La Figure 3-5 montre un graphique élaboré par le Feu Géologue M. King Hubbert. Hubbert a inventé la technique la plus réussie pour la prévision de la production de l'énergie fossile jamais créée. En 1956 Il a estimé les ressources exploitables en pétrole aux Etats Unis entre 150 et 200 milliards de barils et a prédit que "le niveau le plus élevé de la production sera probablement atteint entre les années 1966-1971" (Hubbert 1975, p.371). Sa prévision du déclin de production est intervenue à un moment où l'étude géologique des USA projetait les ressources exploitables à un niveau trois fois supérieur et affirmait que "la taille de la base de ressources ne limiterait en rien la capacité de production domestique". Ceci était vrai au moins pour les 10 à 20 ans mais pas plus " (Gillette 1974). Le niveau le plus élevé de production a été atteint en 1970 au même niveau de production prédit par Hubbert, ce fut l'une des prévisions à long terme les plus exactes de l'histoire. La réussite de Hubbert s(Coller) s'explique par la modélisation de façon explicite du pétrole comme une ressource non renouvelable. La production peut augmenter de façon exponentielle au cours des premières phases du cycle de sa vie mais devait tomber à zéro au moment où elle se réduisait, nécessitant une transition vers des sources d'énergie renouvelables. 7 Pour mettre l'accent sur la nature transitoire de la civilisation du carburant fossile, Hubert exposa la production des carburants fossiles sur une échelle de temps du début de la révolution agricole 10.000 ans avant à 5000 ans dans le future. Contre cette toile de fonds, l'ère du carburant fossile est perçue comme une pointe transitoire – une période unique au cours de laquelle l'humanité vit de façon extravagante d'un héritage riche de capital naturel irremplaçable. L'image dégrise. Mais le bouton de Hubert comme l'ont appelé les critiques, s'étendait sur un horizon temps trop long pour être utile aux décideurs politiques ayant une influence sur les politiques publiques et les stratégies des entreprises qui touchent les prix de l'énergie, les régulations, l'investissement de capitaux, et R&D.

**Figure 3-5**



6 Il existe une grande documentation de modélisation énergétique dans la dynamique des systèmes, partant des travaux dans Meadows et al. (1974). Voir par exemple, Backus (1996), Bunn et Larsen (1997), Fiddaman (1997), Ford (1990,1997,1999), Ford et Bull (1989), Naill

(1977, 1992) pour des travaux sur les marchés nationaux et mondiaux de l'énergie, les services d'électricité, le changement climatique global, et d'autres problèmes relatifs à la politique de l'énergie.

7 Sterman et Richardson (1985), Sterman et al. (1988), et Sterman, Richardson, et Davidson (1990) modélisent les cycles de vie du pétrole aux Etats Unis et dans le monde et étudient l'évolution des estimations de la base de ressource, démontrant pourquoi Hubert avait vu juste alors que les autres méthodes d'estimation se sont révélées si exagérément optimiste.

Le choix de la période de temps peut influencer de façon dramatique l'évaluation des politiques. Au début des années 70 une agence gouvernementale Américaine d'aide internationale a sponsorisé un modèle focalisé sur la région sahélienne de l'Afrique subsaharienne. Le Sahel connaissait alors une croissance démographique rapide parallèlement à l'avancée du désert vers le sud, réduisant les zones de pâturage pour les troupeaux des populations nomades. Le but du modèle était d'identifier d'importantes politiques de levier pour relancer le développement économique dans la région. Le modèle fut utilisé pour évaluer les effets de la plupart des politiques qui avaient cours à l'époque, telles que les forages pour augmenter l'approvisionnement en eau des animaux en captant des aquifères profonds ou la subvention des cultures comme le sorgho et l'arachide. Exécuter le modèle à l'an 2000, un chiffre rond éloigné de plusieurs décennies dans le futur à l'époque, révéla que les politiques produisaient des améliorations. Les subventions ont augmenté la production agricole. Les forages ont permis une croissance des stocks du bétail, augmentant la production de lait et de viande et la fortune des éleveurs. Cependant, exécuter le modèle au delà de l'horizon 2000 et dans les premières décennies du 21<sup>ème</sup> siècle révéla un résultat différent : des stocks de bétail plus élevés ont commencé à déborder les capacités de la région. Tandis que le bétail faisait du surpâturage et piétinait les aires de pâturage, l'érosion et la désertification augmentaient. Le nombre d'animaux chuta, créant une pénurie alimentaire dans la zone. Choisir un horizon de temps trop réduit pour capter ces réactions encourageait l'adoption de politiques contraires aux intérêts à long terme des populations vivant dans la zone et à la mission de l'organisation ayant demandé l'étude. 8

Les modélisateurs doivent se garder d'accepter l'évaluation initiale du client par rapport à la fenêtre de temps appropriée. Ces évaluations sont souvent basées sur des références et des chiffres ronds n'ayant rien à voir avec la dynamique du problème, tels que la fin de l'exercice fiscal, ou le prochain cycle de planification quinquennal. Une bonne règle de pouce consiste à fixer un horizon temps plusieurs fois plus long que les retards de temps les plus longs au niveau du système, et plus.

8 Picardi et Seifert (1970) décrivent un modèle parmi tant d'autres de la zone Sahélienne (le modèle décrit ci-dessus n'a pas été publié).

### **3.5.2 Formuler une hypothèse Dynamique**

Une fois que le problème est identifié et spécifié sur une période de temps approprié, les modélisateurs doivent commencer à élaborer une théorie, appelée théorie dynamique, pour expliquer le comportement problématique. Votre hypothèse est dynamique parce qu'elle doit apporter une explication aux dynamiques caractérisant le problème en ce qui concerne les réactions sous-jacentes et la structure des stocks et des flux du système. C'est une hypothèse parce qu'elle est toujours provisoire, sujette à révision ou abandon pendant que vous apprenez du processus de modélisation et du monde réel.

Une hypothèse dynamique est une théorie de travail de la façon dont le problème surgit. Elle guide les efforts de modélisation en focalisant le modélisateur et le client sur certaines structures. Pour la plupart le reste du processus de modélisation vous aide à tester la théorie dynamique, avec à la fois le modèle de simulation et les expérimentations et collectes de données dans le monde réel.

Dans la pratique, la discussion des problèmes et les théories sur les causes du problème sont mélangées dans les conversations avec l'équipe du client. Il est probable que chaque membre de l'équipe a une théorie différente sur la source du problème ; vous devez reconnaître toutes les théories et les prendre en compte toutes. Dans beaucoup de cas le but de la modélisation est de résoudre un problème d'importance critique qui a persisté pendant des années et engendré d'importants conflits et plus qu'une petite animosité entre les membres de l'équipe du client. Tous les membres défendront avec ténacité leurs positions tout en ridiculisant les points de vue des autres membres du groupe. Au début du processus de modélisation, le modélisateur doit agir en tant que facilitateur, captant ces modèles mentaux sans les critiquer ou les filtrer. Clarifier et explorer les questions sont souvent utiles, mais le rôle du modélisateur à cette phase préliminaire est d'être un écouteur attentif, non un expert satisfait. Divers techniques de découverte et outils de programmation ont été développés pour vous aider à faciliter une conversation productive visant à découvrir les théories des clients sur les causes du problème. 9 Votre but est d'aider le client à élaborer une explication endogène de la dynamique de la problématique.

## **Explication Endogène**

La dynamique des systèmes cherche une explication endogène des phénomènes. Le mot « endogène » veut dire « qui vient de l'intérieur ». Une théorie endogène engendre la dynamique d'un système à travers l'interaction des variables et agents représentés dans le modèle. En spécifiant la façon dont le système est structuré et les règles d'interaction (les règles de décision à l'intérieur du système), vous pouvez explorer les habitudes de comportement créées par ces règles et cette structure et explorer la façon dont le comportement pourrait changer si vous changez la structure et les règles. Par contre, une théorie reposant sur des variables exogènes (celles venant du dehors, c'est à dire de l'extérieur des frontières du modèle) explique la dynamique des variables qui vous tiennent à cœur en termes d'autres variables dont vous avez assumées le comportement. Les explications exogènes ne sont pas en réalité des explications du tout ; elles éludent simplement la question, Qu'est-ce qui a poussé les variables exogènes à changer comme elles l'ont fait ? L'accent sur les explications endogènes dans la dynamique des systèmes ne signifie pas que vous ne devez jamais inclure des variables exogènes dans vos modèles. Mais le nombre d'entrées exogènes doit être réduit, et chaque demande d'entrée exogène doit être soigneusement étudiée pour voir s'il existe dans les faits d'autres réactions importantes des éléments endogènes à la demande. Si tel est le cas, les frontières du modèle doivent être élargies et la variable doit être modélisée de façon endogène.

9 La documentation sur l'élaboration de modèle en groupe augmente rapidement. Reagan-Cirincione et al, (1991), Morecroft et Sterman (1994), Vennix (1996), et Vennix et al, (1997) donnent de bons aperçus des outils et techniques pour découvrir et capter les modèles mentaux des équipes et groupes de clients.

Les conséquences des frontières et de la dépendance du modèle des variables exogènes sont souvent sérieuses. Un exemple typique est donné par le modèle du Project Independence Evaluation System (PIES) (le Système d'Evaluation du Projet Indépendance), un modèle hybride basé sur la programmation linéaire, l'économétrie, et l'analyse des entrées/sorties



utilisées dans les années 70 par l'Administration Fédérale Américaine pour l'Energie (FEA) et plus tard par le Département Américain de l'Energie. Comme le décrit le FEA, le but du modèle était d'évaluer les différentes politiques énergétiques selon les critères suivants : leur impact sur le développement des sources d'énergie alternatives ; leur impact sur la croissance économique, l'inflation, et le chômage ; leurs impacts régionaux et sociaux ; leur vulnérabilité aux perturbations des importations, et leurs effets environnementaux.

Ce qui est surprenant, au vu du but affiché, le modèle du PIES traita l'économie comme variable exogène. L'économie du modèle (y compris la croissance économique, les taux d'intérêt, l'inflation, les cours mondiaux du pétrole, et le cours des carburants non conventionnels) n'a absolument pas été affecté par la situation énergétique (y compris les prix, politiques et production). Dans le modèle, même un embargo complet sur le pétrole importé ou le doublement des cours du pétrole n'aurait d'impact sur l'économie.

Traiter l'économie de façon exogène a rendu le modèle du PIES fondamentalement contradictoire. Parce qu'il supposait des taux de croissance économique élevés et des flexibilités de prix basses, le modèle a prévu d'énormes augmentations de la demande d'énergie, nécessitant des augmentations même plus importantes des obligations de capital au niveau du secteur de l'énergie en même temps que le pétrole domestique moins cher était consommé. Dans le modèle, ces investissements énormes dans la production énergétique étaient assurés sans réduction de l'investissement ou de la consommation dans le reste de l'économie et sans impact sur les taux d'intérêt ou l'inflation. En fait, le modèle laisse l'économie avoir ses pâtés et la laisse les manger aussi.

En partie parce qu'il a ignoré les réactions entre le secteur de l'énergie et le reste de l'économie, le modèle du PIES s'est révélé avec consistance trop optimiste. En 1974 le modèle prévoyait qu'en 1985 les Etats Unis seraient bien lancés sur le chemin de l'indépendance énergétique : les importations d'énergie seraient de 3,3 million de barils seulement par jour et la production d'huile de schiste s'élèverait à 250.000 barils par jour. De plus, ces développements seraient accompagnés de cours du pétrole d'à peu près 22 \$ par baril (dollar au taux de 1984) et d'une forte croissance économique. Ce ne fut pas le cas. Les importations à la fin des années 80 étaient de près de 5,5 million de baril par jour et constituaient plus de la moitié de la consommation de pétrole vers la moitié des années 90. L'huile de schiste et d'autres carburants synthétiques exotiques n'ont jamais vu le jour. Cette situation prévalait malgré d'énormes réductions de la demande d'énergie provoquées par des cours du pétrole au début des années 80 au dessus de 30\$ par baril et la plus grande récession depuis la Crise de 1929.

Des frontières de modèle élargies rendant compte des réactions importantes sont plus importantes que beaucoup de détails dans la spécification des composantes individuelles. Il importe de noter que le modèle du PIES offrait une rupture de l'approvisionnement, de la demande, et des prix de douzaines de carburants dans chaque région du pays pourtant ses projections dans leur ensemble n'étaient même pas proches de la réalité. Quel objectif a été atteint par l'effort consenti pour prévoir la demande de carburant pour les avions ou de naphte dans le Pacifique Nord-Ouest si les théories de base devaient être si manifestement inadéquates et les résultats principaux si terriblement erronés ?

## **La Structure du Système d'Etablissement de Carte**

La dynamique des systèmes comprend divers outils pour vous aider à communiquer les frontières de votre modèle et à représenter sa structure causale. Ces outils comprennent les



diagrammes des frontières du modèle, les diagrammes des sous-systèmes, les diagrammes de la boucle causale, et les cartes des stocks et des flux.

### La charte des frontières du modèle.

Une charte des frontières du modèle résume la portée du modèle en établissant une liste des variables clés qui sont incluses de façon endogène, celles qui le sont de façon exogène, et celles qui sont exclues du modèle.

En guise d'illustration, le Tableau 3-2 montre un diagramme des frontières du modèle pour un modèle conçu en vue d'étudier les réactions entre le système énergétique et l'économie (Sterman 1983). En partie en réaction aux limitations des modèles existants tels que celui du PIES, le Département d'Énergie à la fin des années 70 a cherché à développer des modèles dynamiques avec des frontières élargies (Naill 1977, 1992). Le but du modèle était d'explorer l'impact des cours d'énergie plus élevés sur la croissance économique, le chômage, l'inflation et les taux d'intérêt et la façon dont ces considérations macroéconomiques pourraient gêner le développement de nouvelles sources d'énergie. L'horizon temps du modèle était assez long (1950-2050) pour capter toute la transition des carburants fossiles aux sources d'énergie renouvelables ou autres et conforme au long retard dans le développement, la construction, et la vie utile des stocks de capitaux pour la production et la consommation d'énergie.

**Table 3-2**

TABLE 3-2 Model boundary chart for a long- term model of energy-economy interactions	Endogenous	Exogenous	Excluded
	GNP Consumption Investment Savings Prices (real and nominal) Wages (real and nominal) Inflation rate Labor force participation Employment Unemployment Interest rates Money supply Debt Energy production Energy demand Energy imports	Population Technological change Tax rates Energy policies	Inventories International trade (except with OPEC) Environmental constraints Nonenergy resources Interfuel substitution Distributional equity

Source: Sterman (1983).

A la différence de presque tous les modèles utilisés pour aborder ces problèmes à l'époque, le modèle avait une frontière élargie, avec toutes les variables macroéconomiques majeures produites de façon endogène. A la différence du modèle du PIES, les obligations de capital, de travail et d'énergie des industries énergétiques étaient endogènes et l'industrie énergétique devait entrer en compétition avec d'autres secteurs pour ces ressources. Le modèle contenait toujours plusieurs variables exogènes. Ces variables comprenaient la population, le taux global des progrès technologiques, et le cours du pétrole d'importation. Ces variables exogènes étaient-elles valables ? La croissance démographique et le taux global des progrès

techniques peuvent être affectés par les changements des cours de l'énergie et des changements conséquents dans le taux de croissance économique. Toutefois, il paraît vraisemblable que ces réactions seront moindres. La décision de modéliser le prix du pétrole d'importation de façon exogène est plus problématique. De toute évidence le cours du pétrole affecte à la fois la demande et l'approvisionnement en énergie des Etats Unis, déterminant la quantité importée. En tant qu'importateur principal, les changements au niveau de l'importation du pétrole des Etats Unis peuvent dramatiquement changer l'équilibre entre la demande et l'approvisionnement des pays exportateurs de pétrole, alimentant en retour les cours du pétrole sur le marché mondial. Traiter les cours d'importation de façon exogène réduit une boucle de réaction importante. Dans les discussions sur les frontières du modèle j'ai soutenu qu'il y avait en fait des réactions importantes entre le système énergétique Américain et le marché mondial du pétrole. Mais j'ai aussi soutenu que la dynamique des cours mondiaux était si complexe que les intégrer de façon endogène dépassait la portée et le but du projet. J'avais aidé par le passé à construire un modèle du marché mondial du pétrole pour le Département Américain de l'Energie et j'espérais que les deux modèles pourraient être réunis en fin de compte. La charte des frontières du modèle alerta les clients par rapport à une théorie discutable afin qu'ils puissent évaluer ce que pourrait être l'effet de la réaction manquante.

La liste des concepts exclus donne aussi des avertissements importants à l'utilisateur du modèle. Le modèle a omis les stocks de marchandises et d'équipements (et pour cette raison les cycles d'affaires à court terme)- pas de problème dans un tel modèle à long terme. Le commerce international fut exclu, sauf pour les flux de pétrole, de marchandises, de capitaux, et d'argent entre les Etats Unis et les pays exportateurs de pétrole. Le flux des pétrodollars vers l'OPEP et leur recyclage en tant qu'exportation d'investissements étrangers devait être inclus, mais inclure le commerce d'autres produits que l'énergie aurait élargi le modèle pour l'inclure dans un système macroéconomique global, et je serais probablement toujours en train de travailler dessus. Les contraintes environnementales et les ressources non énergétiques telles que l'eau qui pourraient limiter les nouvelles sources d'énergie telles que les carburants synthétiques étaient exclues, ce qui veut dire que les conclusions sur le taux de développement de ces sources d'énergie exotiques seraient trop optimistes. Le modèle traitait aussi le système d'énergie d'une façon assez globale, si bien que les substitutions inter-carburants (pétrole contre gaz par exemple), n'étaient pas prises en compte, une autre théorie optimiste. Enfin, le modèle n'a pas pris en compte la distribution de revenu, même si certaines politiques énergétiques telles que l'impôt sur l'essence sont régressives à moins qu'elles ne soient compensées par des changements au niveau de l'impôt sur le revenu. Le but de citer toutes ces omissions du modèle était d'aider les utilisateurs du modèle à décider par eux-mêmes si le modèle était adéquat pour leurs besoins.

Les diagrammes des frontières du modèle sont étonnamment et scandaleusement rares. Souvent, les modèles sont utilisés non comme outils de recherche mais comme armes dans une guerre de plaidoyer. Dans de tels cas, les modélisateurs cherchent à cacher les théories de leurs modèles des critiques potentielles. Mais même si les motifs des modélisateurs sont bons, beaucoup se sentent mal à l'aise par rapport au fait de citer ce qu'ils n'ont pas inclus, perçoivent les omissions comme des imperfections et préfèrent mettre l'accent sur les forces de leurs modèles. Bien qu'il s'agisse là d'une tendance naturelle, il réduit l'utilité de votre modèle et la capacité des gens à apprendre de et à améliorer votre travail. En citant explicitement les concepts que vous avez choisis de ne pas inclure, au moins pour le moment, vous offrez un rappel visible des mises en garde par rapport aux limitations et résultats du modèle. Sans une compréhension claire des frontières et théories, les modèles construits pour un but donné sont fréquemment utilisés pour un autre pour lequel ils ne conviennent pas, produisant souvent des résultats absurdes. Trop souvent des modèles avec des théories

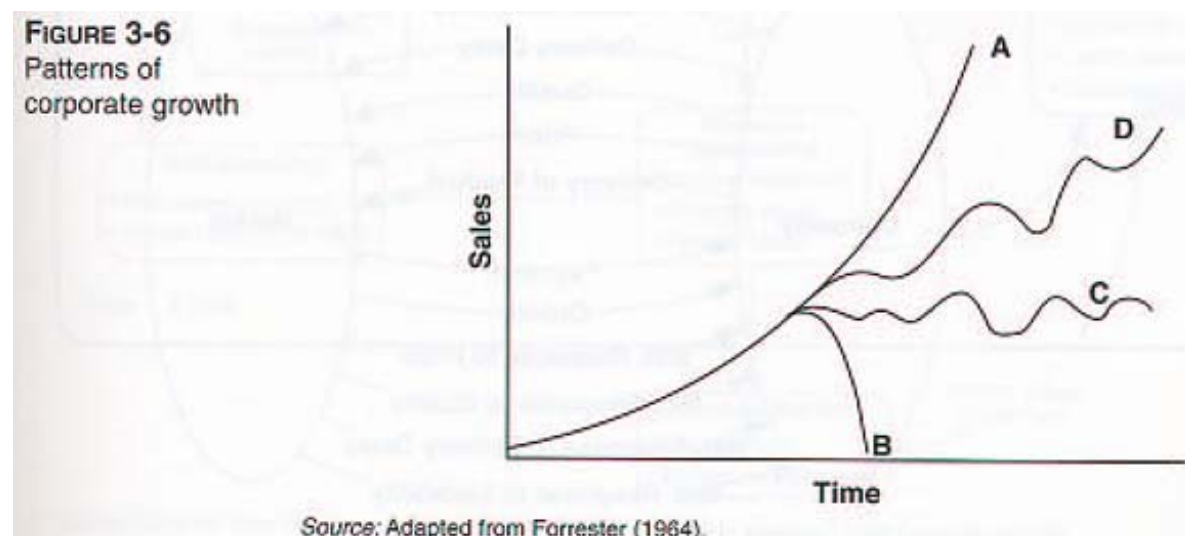
complètement inappropriées et même bizarres sur les variables exogènes et exclues sont utilisés dans l'exécution des politiques parce que les utilisateurs des modèles ne sont pas capables d'examiner les frontières du modèle eux-mêmes et les modélisateurs ne leur ont pas fourni cette information (le chapitre 21 donne des exemples ; voir aussi Meadows et Robinson 1985).

**Le diagramme du sous-système.** Un diagramme de sous-système montre toute l'architecture du modèle. Chaque sous-système majeur est démontré avec le flux du matériel, de l'argent, des biens, des informations etc. qui accouplent les sous-systèmes. Les sous-systèmes peuvent être des organisations telles que la firme et le consommateur ou les sous-unités organisationnelles telles que les opérations, le marketing, et le développement des produits. Les diagrammes des sous-systèmes disséminent les informations sur les frontières et le niveau d'agrégation dans le modèle en démontrant le nombre et le type des différentes organisations ou des différents agents représentés. Ils communiquent aussi certaines informations sur les variables endogènes et exogènes.

Dans les années 60 Jay Forrester a siégé au conseil d'administration de plusieurs sociétés de technologie avancée qui marchaient fort et s'est intéressé à la dynamique de la croissance des entreprises. Pour l'aider à penser sur les problèmes stratégiques auxquels ces entreprises étaient confrontées, Forrester (1964, p.32) a créé un modèle destiné « à démontrer la façon dont les natures différant des habitudes de croissance des entreprises peuvent être créées par diverses politiques et attitudes de gestion au niveau de l'entreprise et par les interactions entre une entreprise et son marché ». La Figure 3-6 montre la mode de référence. Forrester (pp.32-33) explique :

Très rares sont les entreprises qui se développent sans problème, comme sur la courbe A, et qui atteignent éventuellement un plateau sain durable de maturité. Plus fréquemment, l'entreprise suit une tendance, comme sur la courbe B, où elle semble réussir d'abord et se trouve ensuite en face d'une crise aiguë qui mène à la faillite ou à la fusion. Souvent, la tendance est la stagnation de la croissance, comme sur la courbe C, marquée ni par la réussite ni par l'échec. Des entreprises qui démontrent une longue tendance à la croissance, la tendance la plus courante est celle dans la courbe D, où la croissance est accompagnée de crises à répétition.

**Figure 3-6**



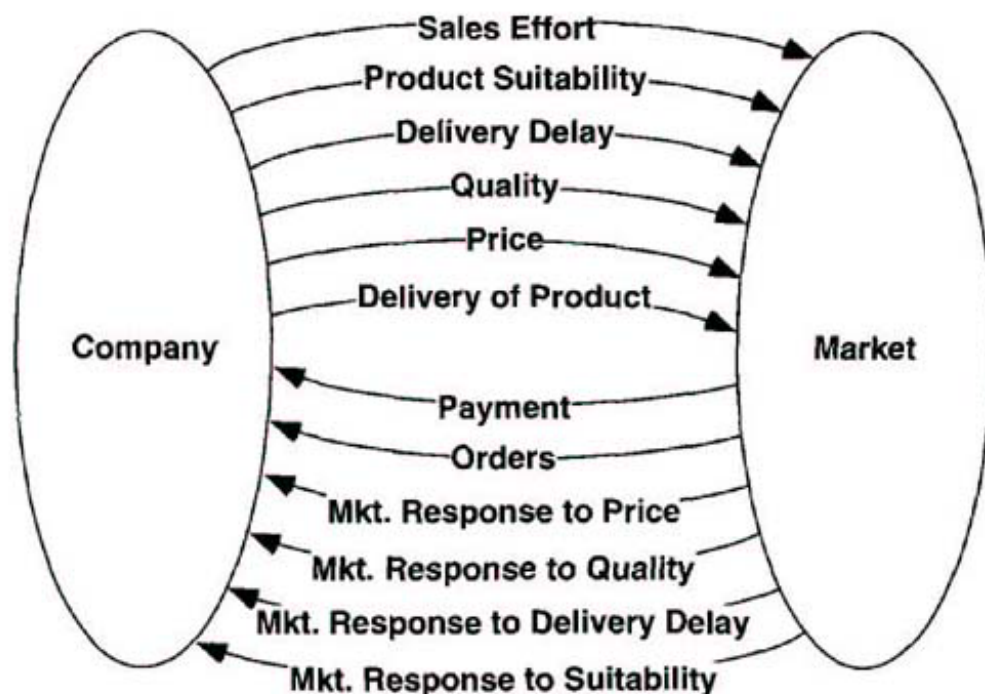
Forrester soutient que « contrairement aux premières impressions, on ne peut pas expliquer ces différences sur la base d'une industrie particulière ou du type et du design des produits... Il faut par conséquent regarder en profondeur la structure des flux d'information et des politiques qui guident les décisions opérationnelles » (p.33). Pour ce faire, le modèle est composé de deux sous-systèmes, l'entreprise et le marché (Figure 3-7).

Les deux sous-systèmes sont accouplés à travers le flux évident des commandes, produits et argent : La firme reçoit les commandes du marché, expédie les produits, et reçoit le paiement. Mais en plus, la firme envoie des signaux au marché y compris le prix du produit, sa disponibilité (mesurée par le retard de livraison), sa fonctionnalité, sa qualité, son adéquation aux besoins du consommateur, et d'autres attributs intangibles de la réputation de l'entreprise. Le marché répond à ces signaux à travers le taux des commandes et à travers les réactions des consommateurs par rapport au prix, à la qualité, au service, aux caractéristiques du produit, etc.. Le diagramme présente de façon élégante les processus de réaction essentiels accouplant une firme à son marché, insiste que les commandes ne dépendent pas seulement du prix, et commence à suggérer la structure qui doit être captée au sein de chaque sous-système. Forrester a réfléchi sur l'importance de ce cadre conceptuel dans sa pensée :

Définir les frontières du système et le degré d'agrégation sont les deux étapes les plus difficiles d'une modélisation réussie. Dans cette étude particulière, un effort à temps partiel pendant près de deux ans fut consacré aux faux départs avant d'arriver au point apparaissant dans la [3-71]. Après, il a fallu huit semaines seulement pour créer le système complet de quelques 200 équations.

Le chapitre 15 présente une version simple de ce modèle, le « modèle de croissance du marché » de Forrester, et démontre la façon dont différentes politiques de gestion peuvent créer les tendances de croissance décrites dans la Figure 3-6.

**Figure 3-7**



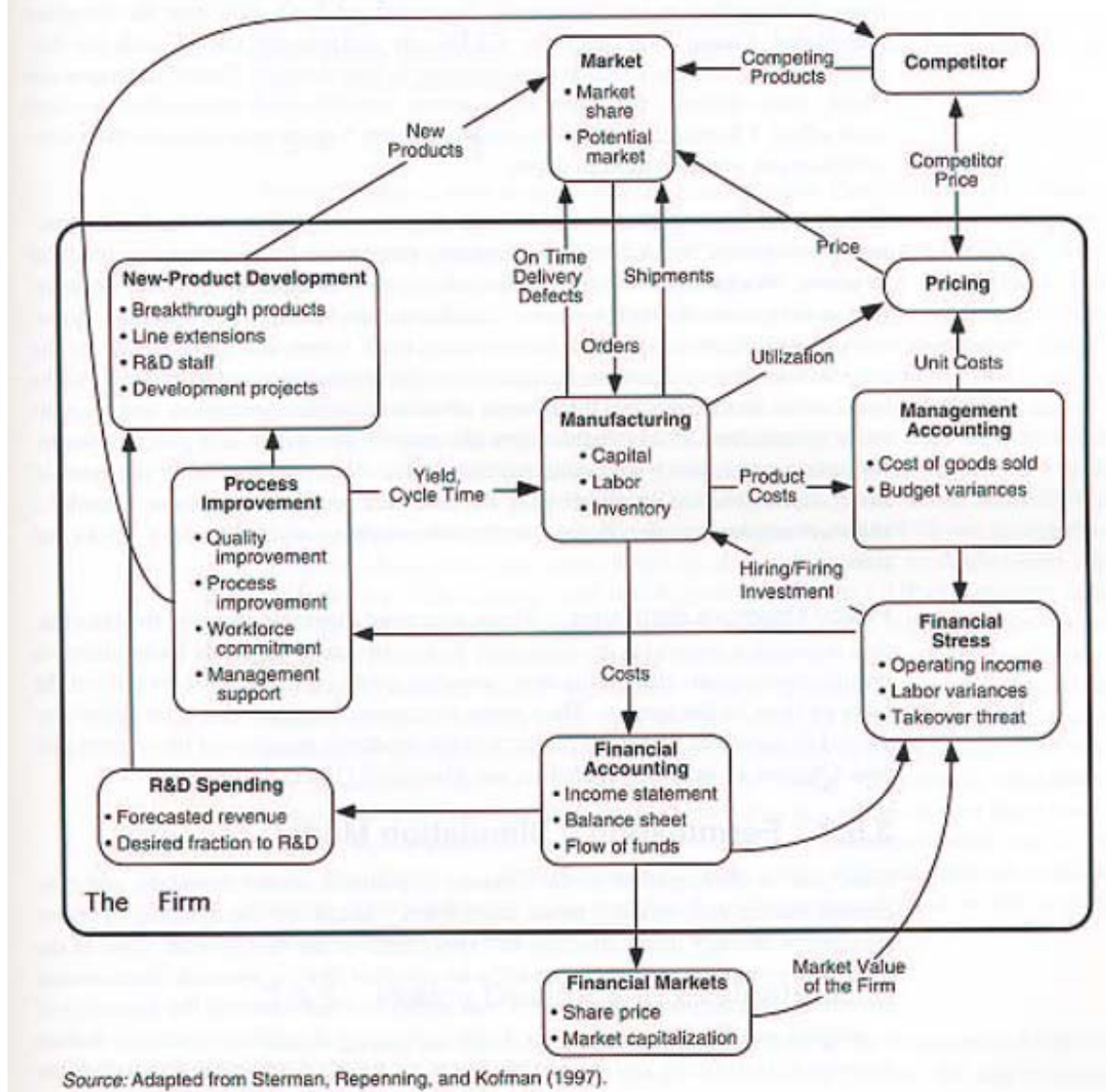
Source: Adapted from Forrester (1964).

Un diagramme de sous-système plus détaillé apparaît dans la Figure 3-8. Le diagramme montre l'architecture d'un modèle de fabricant de semi-conducteurs (Stermann, Repenning, et Koffman 1997). Le but du modèle était d'explorer la dynamique des programmes d'amélioration de processus. La firme avait appliqué avec beaucoup de succès un programme d'amélioration de qualité. Cependant, malgré des améliorations dramatiques en terme de qualité, de productivité, et de réaction aux besoins des consommateurs, les profits opérationnels et le prix des stocks ont chuté, entraînant des licenciements. Explorer ce paradoxe nécessitait un modèle avec des frontières élargies à la fois à l'intérieur de la firme et par rapport aux interactions de la firme avec son environnement. Parallèlement aux sous-systèmes habituels de fabrication, de développement des produits, et de comptabilité, le modèle comportait un secteur d'amélioration du processus et un secteur appelé « Stress Financier ». Le sous-système du Stress Financier n'est pas une sous-unité organisationnelle mais il représente les décisions de la direction générale par rapport aux licenciements, investissements, et l'attention accordée à l'amélioration du processus. Ces décisions étaient affectées par la santé financière de la firme et par la menace de rachat (influencée par la valeur marchande de la firme relativement à la valeur comptable et au flux de liquidité). Le diagramme montre aussi que les ventes et la part du marché de la firme sont des variables endogènes, comme l'est le comportement de la concurrence (à noter que les concurrents réagissent non seulement par rapport aux prix de la firme mais aussi à ses efforts d'amélioration de la qualité). Le prix de l'action et l'évaluation de la firme sont aussi des variables endogènes.



**Figure 3-8**

**FIGURE 3-8** Subsystem diagram for model of a semiconductor firm and its quality improvement  $\Sigma$  program



Les diagrammes des sous-systèmes sont des résumés et ne doivent pas contenir trop de détails. Le diagramme dans la Figure 3-8 est assez complexe ; les diagrammes des sous-systèmes doivent en général être plus simples. Des diagrammes de sous-systèmes multiples peuvent être utilisés pour donner la structure hiérarchique des grands modèles.

**Diagrammes de la boucle causale.** Les diagrammes des frontières du modèle et les diagrammes des sous-systèmes montrent les frontières et l'architecture du modèle mais ne montrent pas la façon dont les variables sont reliées. Les diagrammes de la boucle causale (CLDs) sont des outils flexibles et utiles pour faire le diagramme de la structure des réactions des systèmes dans tous domaines. Les diagrammes de causalité sont simplement des cartes montrant les liens de causalité entre les variables avec des flèches d'une cause à un effet. Le chapitre 2 offre des exemples ; le chapitre 5 contient les règles sur leur construction et leur interprétation en profondeur.

**Les cartes des stocks et des flux.** Les diagrammes de boucle de causalité mettent l'accent sur la structure de réaction d'un système. Les diagrammes de stock et de flux accentuent leur structure physique sous-jacente. Les stocks et les flux suivent les accumulations de matériel, d'argent, et d'informations au moment où de telles accumulations traversent un système. Les stocks comprennent les inventaires des produits, des populations, et des comptes financiers tels que la dette, la valeur comptable et la liquidité. Les flux sont les taux d'augmentation ou de réduction au niveau des stocks, tels que la production et les expéditions, les naissances et les décès, l'emprunt et le remboursement, l'investissement et la dépréciation, et les recettes et les dépenses. Les stocks caractérisent l'état de système et génèrent les informations qui constituent la base des décisions. Ensuite les décisions changent les taux des flux, changeant les stocks et fermant les boucles de réaction dans le système. Le chapitre 2 donne des exemples ; les chapitres 6 et 7 présentent l'élaboration des cartes et le comportement des stocks et des flux.

**Les diagrammes de la structure politique.** Il s'agit des diagrammes de causalité démontrant les entrées d'information vers une règle de décision particulière. Les diagrammes de structure politique focalisent l'attention sur le caractère indicateur des informations utilisées par les décideurs selon les hypothèses du modélisateur en vue de régir le taux des flux dans le système. Ils présentent la structure causale et les retards concernés par des décisions particulières plutôt que la structure de réaction du système en général. Le chapitre 15 donne des exemples ; voir Morecroft (1982) pour les détails.

### 3.5.3 Formulation d'un Modèle de Simulation

Une fois que vous avez développé une théorie dynamique initiale, des frontières du modèle, et un modèle conceptuel, vous devez les tester. Parfois vous pouvez directement tester la théorie dynamique des systèmes à travers la collecte des données ou des expérimentations au niveau du système réel. La plupart de temps cependant, le modèle conceptuel est tellement complexe que les implications de sa dynamique ne sont pas claires. Comme discuté dans le chapitre 1, notre capacité à déduire correctement les dynamiques d'un modèle complexe est extrêmement limitée. De plus, dans beaucoup de cas, surtout dans les cas des systèmes humains, il est difficile, dangereux, contraire à l'éthique, ou simplement impossible de conduire les expériences du monde réel qui pourraient révéler les flux dans une théorie dynamique. Dans la plupart des cas, vous devez mener ces expériences dans un monde virtuel. Pour cela, vous devez quitter le monde conceptuel des diagrammes pour un modèle formel totalement spécifié, avec des équations, paramètres, et conditions initiales.

En réalité, la formalisation d'un modèle conceptuel produit souvent un aperçu important même avant que le modèle ne soit prêt pour la simulation. La formalisation vous aide à reconnaître des concepts imprécis et à résoudre les contradictions qui sont passées inaperçues ou qui n'ont pas été débattues durant la phase conceptuelle. C'est au niveau de la formalisation que votre compréhension est vraiment testée : les ordinateurs n'acceptent aucun argument facile. En effet, les modélisateurs les plus expérimentés écrivent systématiquement les équations et estiment les paramètres à travers le processus de modélisation, même dans les premières phases de l'articulation et de la conceptualisation du problème - souvent avec les clients - comme moyen de résoudre l'ambiguïté et de tester les théories initiales. La pratique de la dynamique des systèmes comprend une grande variété de tests que l'on peut appliquer pendant l'étape de formulation pour identifier les insuffisances des formulations proposées et améliorer votre compréhension de système.

### 3.5.4 Le Test

Le test commence dès que vous écrivez la première équation. Bien entendu, comparer le comportement simulé du modèle au comportement réel du système fait partie du test. Mais le test implique beaucoup plus que la duplication de comportement historique. Chaque variable doit correspondre à un concept significatif dans le monde réel. Chaque équation doit être vérifiée pour la conformité dimensionnelle (pour que vous n'ajoutez pas des pommes et des oranges). La sensibilité du comportement et les recommandations de politique du modèle doivent être évaluées à la lumière de l'incertitude, à la fois paramétrique et structurelle au niveau des hypothèses.

Les modèles doivent être testés dans des conditions extrêmes, des conditions qui peuvent ne jamais se réaliser dans le monde réel. Qu'est-ce qui arrive au PIB d'une économie simulée si d'un seul coup vous réduisez l'approvisionnement d'énergie à zéro? Qu'est-ce qui arrive au modèle d'un fabricant de voiture si vous augmentez les prix de ses voitures par facteur d'un milliard? Qu'est-ce qui arrive si brusquement vous augmentez les stocks d'un concessionnaire de 1000%? Même si ces conditions n'ont jamais et ne pourraient jamais se réaliser, il n'y a pas de doute sur ce que le comportement du système doit être : sans l'énergie, le PIB d'une économie moderne doit tomber à peu près à zéro ; avec un prix un milliard de fois plus élevé, la demande pour les voitures de la firme doit tomber à zéro ; avec un grand surplus de voitures dans les parcs des concessionnaires, la production doit bientôt tomber à zéro mais ne peut pas aller en dessous. Vous pourriez imaginer que les modèles passeront toujours des tests aussi évidents, que la production sans l'énergie, la demande des produits qui coûtent plus que la totalité de la richesse de beaucoup de pays, et une production négative n'auraient jamais lieu. Mais vous aurez tort. Beaucoup de modèles largement utilisés en économie, psychologie, gestion, et dans d'autres disciplines violent les lois fondamentales de la physique, malgré le fait qu'elles peuvent dupliquer assez bien un comportement historique (voir pages 9, 3, 2 du chapitre 21). Les tests sous conditions extrêmes, de même que d'autres tests du comportement du modèle, sont des outils d'importance critique pour découvrir les insuffisances de votre modèle et préparent le terrain pour une compréhension améliorée.

### **3.5.5. Conception de Politique et évaluation**

Une fois que vous et votre client commencez à avoir confiance à la structure et au comportement du modèle, vous pouvez l'utiliser pour concevoir et évaluer les politiques d'amélioration.

La conception de politique est plus qu'un changement des valeurs des paramètres telles que le taux d'imposition ou le ratio de majoration. La conception de politique comprend l'élaboration de stratégies, structures, et règles de décision totalement nouvelles. Puisque la structure de réaction d'un système détermine sa dynamique, la plupart du temps, les politiques à effet de levier importantes impliqueront le changement des boucles de réaction dominantes à travers la re-conception de la structure des stocks et des flux, l'élimination des retards, le changement du flux et de la qualité de l'information disponible aux points de décision clés, ou la re-invention de façon fondamentale du processus de prise de décision des acteurs dans le système.

La solidité des politiques et leur sensibilité face aux incertitudes des paramètres et de la structure du modèle doivent être évaluées, y compris leur prestation dans divers scénarios alternatifs. Les inter-actions entre les différentes politiques doivent aussi être considérées. Parce que les systèmes réels ne sont pas du tout linéaires, l'impact des politiques de combinaison n'est généralement pas la somme de leurs seuls impacts. Souvent les politiques



interfèrent entre elles, parfois elles se renforcent mutuellement et engendrent des synergies substantielles.

### 3.6 Résumé

Ce chapitre décrit le processus de modélisation. Malgré le fait que tous les modélisateurs traversent certaines étapes, la modélisation n'est pas une procédure de livre de cuisine. La modélisation est un processus créatif à la base. C'est en même temps un processus discipliné, scientifique, et rigoureux, posant à chaque étape des défis au modélisateur et au client de faire ressortir et de tester les hypothèses, de rassembler les données, et de réviser leurs modèles à la fois formels et mentaux.

La modélisation est itérative. Personne n'est jamais parvenue à construire un modèle en partant de la première étape et en progressant en séquence à travers une liste d'activités. La modélisation est un processus continu d'itération entre l'articulation du problème, la génération d'hypothèses, la collecte de données, la formulation de modèle, le test et l'analyse. Le processus est jalonné de révisions et de changements, d'impasses et de retours en arrière. La modélisation efficace crée continuellement des cycles entre les expérimentations dans le monde virtuel et les expérimentations et collectes de données dans le monde réel.

Les modèles doivent être clairement focalisés sur le but. Ne jamais construire le modèle d'un système. Les modèles sont des simplifications ; sans un but clairement défini, vous n'avez aucune base pour exclure des éléments de votre modèle, vos efforts sont voués à l'échec. De fait, l'étape la plus importante du processus de modélisation est le travail de définition du problème avec votre client. Le problème lui-même, pas les symptômes du problème, les crises ou les lubies les plus récentes. Bien sûr, comme processus, la modélisation vous conduit à un aperçu plus vaste, votre définition et votre exposé du problème peuvent changer. En fin de compte, de tels recadrages radicaux sont souvent les résultats les plus importants de la modélisation.

Le but de la modélisation est d'aider les clients à résoudre leur problème. Bien que la modélisation remet souvent en cause la conception du problème du client, si le client s'aperçoit finalement que votre modèle ne répond pas à ses préoccupations, vous ne pourrez pas avoir un impact considérable. Le modélisateur ne doit pas trop s'attacher à un modèle, quels que soient l'élégance dudit modèle et le temps qu'il y a investi. S'il n'aide pas les clients à résoudre leur problème, il doit être révisé jusqu'à ce qu'il atteigne son objectif.

La modélisation se passe dans un contexte organisationnel et social. Le cadre peut être une entreprise, mais aussi une agence gouvernementale, une communauté scientifique, un débat politique d'intérêt public, ou n'importe quelle autre organisation. Les modélisateurs se trouvent inévitablement mêlés à la politique de la communauté et se trouvent en contact avec les personnalités de leurs membres. Les modélisateurs ont besoin à la fois de talent analytique supérieur et d'excellentes compétences en relations interpersonnelles et en politique.

Enfin, les modélisateurs ont une responsabilité éthique de poursuivre le processus de modélisation avec rigueur et intégrité. Le fait que la modélisation est enracinée dans un contexte organisationnel et qu'elle est sujette aux pressions politiques n'affecte pas votre responsabilité de faire votre travail selon les standards les plus élevés de recherche scientifique et de conduite professionnelle. Si votre client n'est pas prêt à poursuivre le processus de modélisation honnêtement, laissez tomber et trouvez-vous un meilleur client.