

Justification et validation d'un outil d'apprentissage actif de la dynamique des systèmes industriels en univers incertain

Daniel THIEL

ENITIAA Nantes

Département Sciences et Méthodes d'Aide à la Décision

RÉSUMÉ

Cet article pose la problématique de l'apprentissage des interrelations complexes⁽¹⁾ entre les différents acteurs internes et externes de l'entreprise industrielle. Dans le cadre d'une vision rationnelle de ces phénomènes complexes s'appuyant sur la théorie de la dynamique des systèmes de Forrester, nous tenterons de justifier l'intérêt de cette approche par rapport aux techniques pédagogiques et andragogiques traditionnelles ; ceci en présentant une expérience d'apprentissage actif utilisant un modèle générique de simulation de comportement de systèmes de production par une approche de type "management flight simulator"⁽²⁾.

Mots-clés : Apprentissage, Systèmes de production, Dynamique, Pilotage, Contrôle.

ABSTRACT

This paper formulates the apprenticeship problematic of the complex relationships⁽¹⁾ between the companies internal and external agents. Within the framework of a rational view of these complex phenomena based on the Forrester's System Dynamics paradigm, we try to justify the significance of this method in relation to the traditional educational techniques. Finally, we present an active learning tool by using a generic simulation model of production system behavior based on a management flight simulator approach⁽²⁾.

Key-words : Learning techniques, Production Systems, System Dynamics.

(1) Il s'agit ici d'interrelations de type réciproque au sens de Thomson (1967), donc de type cybernétique.

(2) Voir Bakken et al. in "Modeling for learning Organizations" (1994) ; Forrester (1990) ; Sterman (1988) ; Meadows (1989).

INTRODUCTION

Dans la plupart des programmes de formation des grandes écoles et universités, l'enseignement de la gestion de production se base sur les concepts MRP2⁽³⁾ et Juste à Temps⁽⁴⁾. Ces formations contribuent à transmettre aux futurs décideurs des connaissances abstraites et "statiques" sur de "nouveaux" modes d'organisation et de pilotage industriels. En complément à cette méthode didacticielle d'apprentissage, nous proposons de recourir à une pédagogie active s'appuyant sur des modèles génériques de simulation et sur la théorie de la dynamique des systèmes de Forrester (1969, 1984), démarche que nous tenterons de justifier dans cet article. C'est en effet par l'intermédiaire de l'expérimentation que cette méthode inductive facilite l'émergence de nouveaux concepts de la dynamique des systèmes d'information et du pilotage des entreprises.

Le texte qui suit peut s'inscrire en continuité de l'article de Baile (1996) qui posait le problème de la finalité de la formation en systèmes d'information en souhaitant ouvrir une nouvelle réflexion sur le "comment former aux SI ?". Dans notre démarche de formation à la gestion industrielle, et en reprenant les termes de l'auteur, nous avons considéré les SI comme "fonctionnels, inter-fonctionnels et inter-organisationnels", en les étudiant essentiellement sous l'angle de leurs implications pratiques, organisationnelles et opérationnelles. Au niveau de l'ingénierie de ces systèmes de pilo-

tage, nous rejoignons également S. Baile qui justifie l'apport des méthodes de construction qui "apportent d'un point de vue conceptuel, une vision globale des "systèmes"". Notons enfin que l'orientation de l'enseignement de la gestion de la production et du management des systèmes d'information que nous suggérons, est axé sur les "fins" et non sur les "moyens techniques".

Le texte suivant est scindé en deux parties

La première partie présente tout d'abord la problématique de l'apprentissage des mécanismes de la gestion industrielle. L'objectif poursuivi consiste à ce que l'apprenant puisse être capable d'assurer une régulation et une synchronisation des flux d'information et de matières face à divers dysfonctionnements d'un système de production. Nous montrons alors l'intérêt d'une approche holistique des organisations industrielles et plus particulièrement, de la dynamique des systèmes de Forrester. Puis nous tenterons de positionner ce paradigme par rapport à différentes méthodes et techniques pédagogiques usuelles.

Dans la seconde partie, nous présentons un outil pédagogique original basé sur un modèle générique de systèmes de production. Différents scénarios perturbateurs tels que les fluctuations de la demande commerciale, l'inefficience d'un système d'information, peuvent être simulés. L'apprenant peut ainsi effectuer des analyses comportementales par une exploration arborescente des causes et

(3) *Manufacturing Resources Planning*, Wight, 1974, 1984.

(4) Shingo, 1983 ; Sekine, 1983.

des effets qui facilitent la compréhension des mécanismes de gestion nécessaires à la stabilité et à l'équilibre de ces systèmes.

1. APPRENTISSAGE DES MÉCANISMES DE LA GESTION INDUSTRIELLE

1.1 Problématique de l'apprentissage

D'une manière générale, les types de connaissances à acquérir dans le domaine du management industriel peuvent intégrer des aspects statiques, cinématiques et dynamiques (au sens de Thom, 1972). Mais de nombreuses représentations structurelles de l'usine se sont limitées à ne décrire que les systèmes opérants en négligeant de prendre en compte la dynamique complexe des flux d'information et de décision (cf. les typologies usuelles des systèmes de production, voir par exemple Kieffer, 1986, ch. 1). De cette analyse et d'après d'autres observations en industrie, nous préférons orienter le processus d'apprentissage vers la connaissance du mouvement de ces flux (et de leurs origines) et vers le rôle de l'intervention humaine, plutôt que vers les infrastructures et installations qui sont nécessaires à la réalisation des opérations.

Comment exprimer les connaissances d'une réalité industrielle ?

Une première tentative consisterait à les définir de manière qualitative, plus ou moins objective et

plus ou moins formalisée. Elles pourraient par exemple se caractériser par des connaissances "intuitives", informelles, métaphoriques, ... (cf. Watzlawick, 1988). La seconde manière s'inspirerait de la démarche classique de la théorie de Forrester consistant tout d'abord à construire un schéma causal avec des relations non-linéaires, à élaborer un modèle symbolique représentant les états et les flux, puis à simuler les équations mathématiques aux différences finies en vue d'une découverte de ce que Forrester qualifiait d'"inconscient organisationnel". Nous n'opposons pas ces deux modes de représentations des connaissances, car ils sont tout à fait complémentaires. La première phase que nous conseillons d'ailleurs, consiste à découvrir la réalité par immersion dans l'entreprise en tentant de dégager de manière objective des relations entre différentes variables sous une vision systémique. C'est ce que nous désignons par "audit systémique" permettant une appréhension globale de la réalité complexe. La seconde phase enrichie de la première, consiste à traduire ces connaissances subjectives, informelles ou intuitives⁽⁵⁾ en un modèle élaboré progressivement à partir de relations causales (non-linéaires dans la plupart des cas). Comme l'a précisé Bensoussan (1982), "le premier objectif de la modélisation est positiviste dans le sens où il développe des modèles de connaissance. Le second aspect normatif, a pour objectif d'aider le praticien à "objectiver" les images qu'il perçoit de façon subjective...".

(5) En ce qui concerne les connaissances "intuitives", Simon affirme que l'intuition est un phénomène de reconnaissance (1969).

Il reste la problématique de l'apprentissage du fonctionnement de ces systèmes complexes. Une méthode efficace, tant au niveau de l'objectivité que de la pertinence, consisterait à observer en temps réel sur le terrain, les informations couplées aux décisions prises dans ces systèmes et à en analyser les conséquences. Moisdon (1984) note à ce propos que "l'on ne peut guère analyser le fonctionnement de l'organisation que lorsque celle-ci se met en mouvement, de même qu'un champ de force dévoile sa structure quand on peut observer les déplacements des objets qui y sont plongés". Mais la durée de cette approche est trop longue, ce qui explique l'utilisation plus courante de la simulation informatique (Pecquet, 1992). Nous avons cependant retenu une double approche combinant observations sur le terrain et conception de modèles de simulation améliorant ainsi la validation de ces modèles. En modélisation, il est souvent conseillé de s'inspirer *a priori* de théories existantes pour bâtir un modèle qui se complète ou "s'ajuste" par une observation du terrain⁽⁶⁾. Mais il n'existe pas de lois décrivant les problèmes particuliers rencontrés dans les industries, comme par exemple : intensifier le contrôle du personnel "direct" de production suite à une baisse de la productivité, augmenter la polyvalence pour "flexibiliser" la capacité suite à des fluctuations de la demande ;

... Seules des théories plus générales telles que la théorie des systèmes et quelques théories sur la décision peuvent faciliter la modélisation de systèmes complexes. Il en est de même dans les autres disciplines des sciences de gestion comme par exemple la GRH⁽⁷⁾.

Nous allons montrer dans les propos qui suivent, comment la démarche systémique s'appuyant sur une approche qualitative préalable (empirique au sens d'Aktouf, 1987), peut contribuer à l'amélioration de la connaissance et à l'apprentissage de la dynamique des systèmes industriels.

1.2 Paradigme de la dynamique des systèmes pour l'apprentissage du management industriel

Du constat préalable sur les difficultés de formalisation des connaissances du fonctionnement des systèmes industriels, nous retenons la suggestion de Richmond (1990) qui considère qu'un changement fondamental de l'éducation des hommes pourra s'effectuer en fusionnant le processus de formation, le paradigme systémique et les outils d'apprentissage. Nous décrivons dans ce paragraphe la méthodologie de la théorie de Forrester.

L'objectif essentiel de la dynamique des systèmes consiste à définir les liens de causalité circulaire qui se manifestent dans un schéma cybernétique. Cette théorie se

(6) Cf. Walliser, 1977, pour qui il s'agit d'un "processus circulaire pouvant débiter à n'importe quel stade".

(7) L'ouvrage collectif coordonné par Brabet (1993) note l'insuffisance de théories dans ce domaine et précise que "l'expérimentation en laboratoire est peu utilisée car elle réduit abusivement la complexité des situations d'entreprise".

base sur le principe de l'existence de boucles fermées où une variable de contrôle agit sur une variable d'action⁽⁸⁾, qui par la suite, par l'intermédiaire d'éventuelles autres variables, contre-réagit sur cette même variable de contrôle. Ce mécanisme montre l'interaction mutuelle entre différentes variables d'un système complexe où la notion de pilotage évolue à chaque transition spatio-temporelle. La construction progressive de ces modèles "dynamiques" passe par une phase qualitative initiale de formalisation des relations causales dans les systèmes. Il s'agit de construire la structure de *feedback* par l'intermédiaire du diagramme causal. Cette approche est clairement décrite dans Forrester (1969) et Roberts (1984). Richardson (1981) propose une approche *top-down* pour conceptualiser le modèle, tout d'abord en décrivant la structure physique du système, puis les flux d'information et enfin les conséquences des actions à l'origine des changements dans le système. Dans la phase suivante, Forrester (1958) préconise des modèles composés de boucles de *feedback* élaborées à partir de symboles de niveaux et de taux. Les variables de niveaux décrivent l'état des systèmes par une intégration continue des résultats de l'action dans ces systèmes. Les variables de taux (ou de flux) expriment l'action par des débits d'entrée et de sortie dans les niveaux. Les niveaux existent en permanence même si toute activité cessait,

alors que les taux ou flux disparaîtraient. Ce mode de représentation permet par la suite de traduire les variations de ces états par l'intermédiaire d'équations différentielles et d'en étudier leur comportement dans le temps. Cette vision industrielle correspond à celle de systèmes en équilibre relativement clos et entropique au sens de Buckley (1967) et se rapproche donc des systèmes homéostatiques ouverts et néguentropiques comme les systèmes complexes adaptatifs (Lugan, 1993).

Nous tenterons dans le paragraphe suivant de montrer que cette approche peut être le schème central d'une méthodologie d'apprentissage.

1.3 Dynamique des systèmes et méthodes pédagogiques

Dans ce paragraphe, la dynamique des systèmes en tant que démarche théorique pour l'apprentissage de la gestion industrielle, est positionnée par rapport à certaines doctrines et techniques pédagogiques traditionnelles. En préalable, nous essayons de décrire le processus cognitif de l'apprentissage en constatant que de nombreux psychologues ont prôné un apprentissage par l'expérience⁽⁹⁾. Senge montre qu'il existe de nombreux cas où l'observation des conséquences de chacune de nos actions (par essais-erreurs) ne sont plus visibles, "quand les effets d'une action deviennent

(8) Au sens de Walliser (1977).

(9) "L'expérience antérieure occupe une place importante dans la résolution de problèmes et les gens ont en effet tendance à rechercher des types de solutions qui ont connu du succès par le passé" (Trotter & Mc Connel, 1980).

extérieurs à notre champ de vision, il n'est plus possible d'apprendre par l'expérience" (Senge, 1990). Reix (1995 : 275) dénote également l'inefficacité des approches "intuitives" par essais-erreurs pour construire un système d'information même simple. Mais de manière paradoxale, Alain (1959) prétend que "l'esprit n'entre en action qu'au contact de l'expérience" et Dewey fait remarquer que dans diverses étapes du processus expérimental, l'individu garde la trace des idées, des activités et des conséquences observées. "Il faut que la réflexion soit capable de réviser et de totaliser. Réfléchir, c'est envisager rétrospectivement ce qui a été fait de manière à en dégager les significations diverses, lesquelles deviennent pour l'intelligence une sorte de capital en réserve pour les expériences futures. Là est le cœur de l'organisation intellectuelle et de la discipline de l'esprit" (Dewey, 1968). En guise d'esquisse de conclusion à ces réflexions d'ordre philosophique, nous avons souvent observé dans le cadre de nos expériences industrielles, que de nombreux gestionnaires avaient acquis "la" compétence en l'entreprise par la combinaison d'un intellect développé lors d'une formation supérieure préalable et d'un apprentissage par l'expérience sur le terrain. En effet, leurs premières missions de cadre opérationnel s'appuyaient souvent sur une démarche déductive. Mais c'est dans le cadre d'une réflexion d'ordre stratégique pour l'entreprise, que cette approche n'est plus efficace et nécessite d'autres ressources cognitives laissant une plus grande place à la première phase du processus de décision, l'*intelligence* selon Simon (1960).

Dans un second temps, nous avons choisi de présenter trois doctrines, l'une issue des écoles scientifiques et les deux autres, des écoles nouvelles. Celles-ci nous ont paru les plus intéressantes pour positionner les différents aspects de notre démarche d'apprentissage.

La première doctrine élaborée par Spencer (1885) considère que "notre esprit marche nécessairement du concret à l'abstrait" ce qui pour Alain (1959) est contesté car, d'après ce dernier, "toutes nos conceptions doivent porter la double marque de l'ordre humain et de l'abstraction préliminaire... Le progrès de tout esprit se fait de l'abstrait au concret". Nous ne voulons pas entrer dans une polémique épistémologique mais nous tenterons de positionner notre démarche pédagogique par rapport à ces deux affirmations. Dans la phase de modélisation systémique que nous préconisons, c'est à partir du concret que nous concevons un modèle abstrait mais notre référentiel épistémologique propre (abstrait) inspire notre démarche concrète de formalisation. C'est la construction du diagramme causal qui développe en soi "la puissance d'observer avec exactitude et de penser soi-même" (Spencer, 1885). Spencer précise d'ailleurs que dans l'étude des sciences, "les rapports qu'on présente à l'esprit sont des rapports de causalité ; et quand on enseigne bien, l'élève les comprend comme tels".

La deuxième doctrine est née après une étude critique de l'empirisme anglais ; il s'agit de Dewey (1968) qui rejoint Rousseau

en préconisant que l'élève doit penser autant que manipuler⁽¹⁰⁾. En dynamique des systèmes, l'analyse des résultats de simulation nécessite de remonter à la structure du modèle alternant ainsi manipulations et réflexions. Nous n'approuvons pas systématiquement certaines affirmations de Dewey consistant à déterminer "la relation, à l'intérieur de l'expérience, entre les œuvres du passé et les événements du présent", car le passé peut être source d'erreurs de jugement face à des problèmes complexes.

Enfin, d'après la doctrine de Decroly (1929), dans la pratique pédagogique il y a des procédés qui sont en contradiction avec la théorie classique de l'induction et de la déduction. Pour lui, le fait apparent fondamental est que le travail mental à n'importe quelle étape, est ou peut être dominé, déterminé, ou en tout cas influencé par diverses tendances du sujet. Pour désigner cet aspect spécial de notre activité mentale, il propose une "globalisation qui convient surtout pour désigner le stade perceptif". Au stade initial de perception de la réalité, nous nous efforçons de développer une vision systémique qui pourrait correspondre à cette fonction cognitive de globalisation.

Ces doctrines ont posé les fondements de différentes méthodes⁽¹¹⁾ pédagogiques actuelles. D'après Cousinet (1949), au fur et

à mesure que la pédagogie s'est constituée, le mot méthode a changé de sens car "la méthode valait ce que vaut tout empirisme, qui n'est qu'un résultat d'expériences mal conduites... Le consommateur, c'est-à-dire l'écoller, n'avait autre chose à faire qu'à les recevoir". C'est souvent le cas des méthodes didacticielles qui risquent d'entraîner une forme d'acquisition statique des connaissances aboutissant ainsi à une faible efficacité de l'apprentissage. À l'opposé, la méthode interrogative, notamment la méthode socratique, considère que les connaissances doivent surgir de l'esprit où elles se trouvent à l'état latent. C'est donc en posant un certain nombre de questions simples que l'apprenant pourra mettre directement en œuvre la pensée systémique⁽¹²⁾ (cf. Unesco, 1981). Nous citerons également les méthodes intuitives qui sont sensées apporter une connaissance directe par l'observation sans l'intermédiaire d'une opération intellectuelle. Piaget (1970) considère que "l'intuition reste phénoméniste, parce qu'imitant les contours du réel sans les corriger, et égocentrique, parce que constamment centrée en fonction de l'action du moment : elle manque, de la sorte, l'équilibre entre l'assimilation des choses aux schèmes de la pensée, et l'accommodation de ceux-ci à la réalité". C'est pourquoi cette méthode ne nous paraît pas adaptée à la per-

(10) "Learning by doing", c'était déjà la formule de Rousseau (1762) et de Froebel (1861).

(11) Méthode, technique et procédé sont quelquefois difficiles à distinguer, car des expressions identiques recouvrent des réalités très différentes.

(12) "Réussir dans une approche linéaire mène à la satisfaction ; "réussir" dans une approche non linéaire, holistique, heuristique, mène à la joie de la découverte d'une signification qui nous appartient en propre" (Williams, 1986).

ception de la dynamique des flux dans l'entreprise. Nous sommes par contre en accord avec Comenius (Leif, 1959) qui précise que "l'on regarde non seulement pour savoir, mais pour comprendre en remontant aux causes". Cette affirmation correspond en fait à la phase de construction du diagramme causal du système étudié. Pour Spencer (1885), ce type d'enseignement n'est que l'organisation rationnelle des connaissances empiriques, par l'application des méthodes d'observation et des règles d'induction.

Les méthodes dites actives selon Piaget (1970), considèrent que l'expérience proprement dite, doit être profonde et élaborée par une pensée vivante, qui s'en nourrit. D'après Dewey (1968), "l'esprit éveillé doit obtenir les qualités qui ensuite rendront plus ferme sa démarche par (1) l'habitude de la réflexion, de l'intérêt, de l'attention, de la précaution (2) la faculté d'établir des rapports entre objets, proches ou lointains, présents, passés et futurs (3) l'habitude à vite distinguer l'essentiel de l'accessoire (4) le souci de remonter aux causes et de descendre aux effets (5) le besoin de vérification qui marque le plus haut degré de l'intellectualité". Pour Mialaret (1983), "l'action et la pensée sont liées". En faisant agir, on favorise le développement et l'exercice de la pensée ; une pensée ferme et solide dirige mieux l'action et la rend plus efficace. Les méthodes actives ont donc pour objectif essentiel de

provoquer cette réaction de la personnalité et de fortifier l'activité mentale par l'exercice réel et original. Une formation par la dynamique des systèmes peut contribuer à développer cette double relation de réflexion (par la phase de modélisation) et d'action (par les simulations informatiques). Enfin, l'art de la recherche est précisément celui qui a été le plus développé par la méthode Cousinet (1949). D'après lui, il est beaucoup plus important de voir ce que les élèves ont fait que d'essayer de chercher ce qu'ils savent, beaucoup plus intéressant et beaucoup plus conforme à leur nature.

De l'analyse critique des différentes méthodes pédagogiques que nous venons de présenter, il serait tentant de ne développer que des méthodes attrayantes ou attractives basées sur des jeux de simulation. Par contre, leur inconvénient majeur est de pouvoir substituer l'aspect ludique et l'intérêt réellement porté par l'élève (remarques de différents philosophes⁽¹³⁾). "Dépasser l'objectif de l'entraînement, approcher celui de l'expérimentation", telle était l'idée des jeux selon Kaufmann (1976). De Bono (1976) critique les jeux "éducatifs" qui pour lui sont des artifices s'éloignant de la réalité : "*Games have an internal logic and a good player quickly learns this internal logic because it is repeated so often. Life, unfortunately, has not such internal logic...*". Cette remarque est également celle de Cousinet (1949) qui sou-

(13) "L'attention facile n'est pas l'attention" (Alain, 1959) ; "Parmi tant d'admirables méthodes pour abrégier l'étude des sciences, nous aurions grand besoin que quelqu'un de nous en donnât une pour les apprendre avec effort" (Rousseau, 1762).

ligne que certains jeux approuvés par plaisir, n'apportent aucun progrès dans la connaissance car les deux notions de plaisir et de progrès sont toutes les deux amphibologiques. Par contre, on peut ne s'intéresser que médiocrement à ce qui fait plaisir et on peut au cours d'une activité à laquelle on s'intéresse, rencontrer des formes qui ne causent aucun plaisir, mais dont on sent la nécessité en vue de la fin qu'on se propose. Forrester (1969) montra également les limites de la plupart des jeux utilisés pour la formation au management : *"There are some close similarities between the business game and the full dynamic model. A few of decisions are made by the human participants as the game progresses. In both there is a mathematical model, usually there is a computer, both concentrate on the business system, and both aspire to enhance understanding of the broader business scope. Here the similarities end"*.

Ce constat un peu sévère sur l'utilisation des jeux a fait naître une nouvelle génération d'outils conçus à partir des modèles de la dynamique des systèmes et permettant d'analyser les causes à partir d'un diagramme d'influence (voir à ce sujet les méthodes et techniques proposées par Forrester dans *"Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st Century"* (1994)⁽¹⁴⁾. Nous pré-

sentons dans la seconde partie de cet article une démarche similaire que nous avons développée pour la formation à la gestion industrielle.

2. PROPOSITION D'UN OUTIL D'APPRENTISSAGE DE LA DYNAMIQUE DES SYSTÈMES INDUSTRIELS

La structure des systèmes industriels intègre généralement un ensemble d'aspects économiques, sociaux et techniques⁽¹⁵⁾. Les décisions de pilotage émergent d'une organisation industrielle complexe constituée⁽¹⁶⁾ d'individus et de technologies. Par rapport à la problématique de la gestion industrielle consistant à assurer ce pilotage, un modèle descriptif basé sur la complexité du fonctionnement de ces systèmes et sur l'incertitude⁽¹⁷⁾ de leurs environnements interne et externe, nous a paru le plus adapté. Nous présentons tout d'abord l'origine de l'élaboration d'un modèle générique de comportement de systèmes de production. Puis nous montrons comment ce modèle a été intégré dans un logiciel d'apprentissage utilisé dans le cadre d'un jeu de simulation et quels en ont été les résultats.

(14) Voir aussi Machuca et al. (1992 ; 1993) ; Bernstein (1996) ; Boorstein & Smith (1996) ; Boucher (1996) ; Eloy (1996).

(15) Cf. Woodward (1971) qui s'est intéressée plus particulièrement à la sociologie comme outil explicatif des phénomènes organisationnels en relation avec la technologie.

(16) D'après Baranger (1992), il semble d'ailleurs nécessaire d'établir une relation entre la complexité et la technologie.

(17) Cf. la typologie proposée par Gousty & Kieffer (1988) ; Kieffer (1986).

2.1 Structuration d'un modèle générique

C'est à partir d'une enquête préalable auprès de 27 entreprises⁽¹⁸⁾ et d'une analyse de données correspondant à plus de mille réponses face à différents dysfonctionnements, que nous

avons relevé un certain nombre de variables considérées comme les plus influentes dans les systèmes de production.

Ces indicateurs les plus significatifs sont présentés dans le tableau de la figure 1.

Figure 1. Les indicateurs du système de production

Variables de commande	Variables contrôlées
<ul style="list-style-type: none"> - Demande commerciale - Qualité de service - Productivité - Arrêts de travail - Taux de manquants - Taux de rebuts et de retouches - Niveau des stocks - Qualité de transmission de l'information et des ordres - Ratio économique 	<ul style="list-style-type: none"> - CAPACITES DE PRODUCTION - DELAIS

Les exigences commerciales, variables exogènes au système de production, peuvent être des commandes clients ou des délais de livraison souhaités par le marché. Le volume des stocks de produits finis, semi-ouvrés et de matières premières ainsi que la taille des encours se contrôlent et se comparent en permanence aux valeurs autorisées. Les coûts réels de consommation de matières et de main-d'œuvre se valorisent et se comparent aux dépenses initialement budgétisées. La qualité de service client se quantifie à partir du respect des délais prévus (taux de service), de la qualité des produits et des services livrés et de

la valeur du délai moyen de livraison par rapport à l'exigence du marché. Les taux de manquants, de rebuts et de retouches, la qualité de la transmission des informations et des ordres (cf. qualité des systèmes d'information) se quantifient également pour évaluer la performance du système de production.

Ces différentes variables de commande ne sont pas toutes indépendantes. En effet, la dégradation du taux de manquants par exemple, explique la baisse de la qualité de service. Cependant il s'agit d'indicateurs sensibles suivis individuellement par les entre-

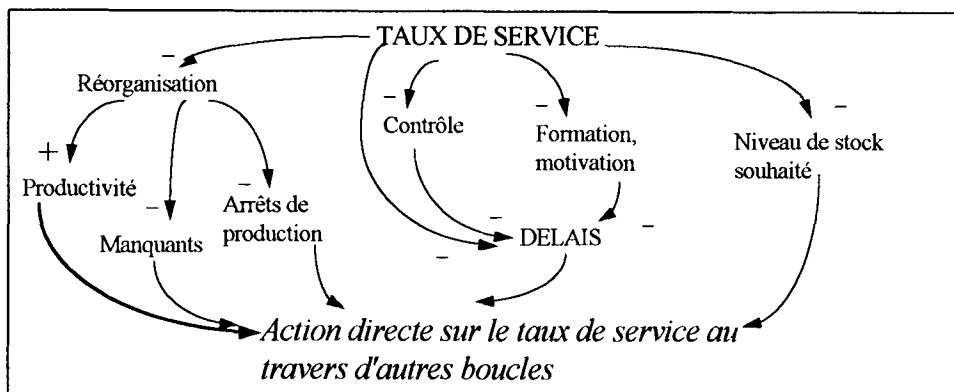
(18) Les entreprises ont été les suivantes : Aeroquip, Aérospatiale Afma Robots, Arjomari Wiggins, Bio, Bull, Bundy, Compagnie Générale de Productique CGP, Faiveley, Gault et Frémont, Gobel SA, Guy Degrenne, Jaeger, Joucomatic, Matra Micro Systèmes NCR France, Polyflex, Roc SA, Scortec, SKF, Snecma, Sourdillon, Still Saxby, Tambrands, Tio, Valéo, Vestil.

prises même si des recherches de corrélation et de covariances peuvent être entreprises *a posteriori*. Ensuite, nous avons relevé des variables d'action qui dans le cadre d'une vision globale des systèmes de production axée sur une problématique d'apprentissage, se limitent à deux variables macroscopiques d'action dans les systèmes opérants. Il s'agit des capacités et des délais de production qui permettent d'assurer l'efficacité de l'outil productif par rapport aux exigences commerciales. Le rapport entre la charge et la ca-

pacité nette de production permet de quantifier globalement la productivité. Le "degré" de motivation dans le système socio-technique de la production ne se contrôle pas directement. Il influence la qualité de service de l'entreprise et dépend souvent de décisions prises en amont.

Pour montrer les relations de causalité entre certaines variables de ces systèmes, un exemple de diagramme d'influence avec différentes boucles de *feedback*, est présenté en figure 2.

Figure 2. Exemple de diagramme causal



Ce schéma ne représente qu'une partie du modèle générique global qui correspond aux effets de la dégradation du taux de service clients. À moyen terme, en cas de mauvaises livraisons en quantité, qualité et/ou délai, une action s'effectue régulièrement en augmentant les contrôles ou en modifiant les plannings de production (niveaux de stocks souhaités). Il a également été observé dans notre enquête une remise en cause des méthodes de travail (réorganisa-

tion) ou une tentative d'amélioration de la motivation du personnel. Ces différentes boucles homéostatiques permettent par rétroaction, de se rapprocher d'un taux de service acceptable.

Le modèle générique complet est composé de 226 variables et de plus de 500 boucles interconnectées⁽¹⁹⁾. Il a été validé par comparaison *a posteriori* avec des comportements réels de systèmes industriels. Au niveau méthodologi-

(19) Pour une description précise du modèle générique et des équations du modèle, voir Thiel (1993, 1996).

que, nous nous sommes référés entre autres, aux conseils de Walliser (1977) sur le processus de généralisation des modèles qui consiste à élargir le champ de validité par rapport aux quatre paramètres suivants : l'objectivité, l'universalité, la permanence et la globalité des modèles. Le processus d'induction a consisté à remplacer un ensemble de "modèles" et de conjectures issus de l'analyse qualitative des systèmes de production, par un modèle qui soit plus universel.

Nous ne présenterons pas dans cet article les résultats des différentes simulations effectuées dans le cadre de travaux de recherche. Suite à ces différentes expérimentations, nous avons décidé d'utiliser ce même modèle à des fins pédagogiques, ce que nous proposons de montrer maintenant.

2.2 Déroulement de la formation

Pratique pédagogique de la modélisation

En phase introductive, nous proposons une démarche de formation à la modélisation progressive des systèmes de production⁽²⁰⁾. Tout d'abord, les étudiants ont à concevoir des modèles relativement limités pour comprendre différents mécanismes de gestion industrielle en intégrant des aléas divers aussi bien

internes qu'externes⁽²¹⁾. Puis il leur est demandé de travailler sur le modèle générique présenté précédemment, de manière à observer *in vitro* certains comportements. Dans cette deuxième phase, l'objectif pédagogique des simulations dynamiques consiste à mieux comprendre des comportements complexes des systèmes et de guider leur pilotage à partir des résultats de simulations. La dynamique des systèmes de production est activée lors de fluctuations des valeurs des variables les plus sensibles. La démarche consiste également à tenter de rapprocher les multiples structures cinématiques que les étudiants peuvent identifier, de la dynamique de certains comportements industriels et ce, indépendamment de l'activité de l'entreprise. Il ne s'agit donc pas d'une analyse d'un système particulier, mais d'une recherche de relations entre différentes structures industrielles et des comportements primitifs types. Pour cette raison et dans le cadre qui nous préoccupe, les résultats numériques de simulation n'ont qu'une valeur relative de comparaison entre les modèles élaborés⁽²²⁾.

Principe du jeu de simulation

Chaque groupe d'étudiants dispose du logiciel de simulation développé sous *PC-Windows* dans

(20) Cette démarche pédagogique et les outils associés ont été utilisés dans le cadre de formations de 2^e et 3^e cycles à l'ESC Tours, à l'ENITIAA et à l'IAE de Nantes.

(21) Suivant un principe identique aux modèles présentés par Lyneis (1988) in "Corporate Planning and Policy Design : A System Dynamics Approach".

(22) "Une grande précision des résultats est secondaire pour l'amélioration de la connaissance" (Forrester, 1969).

un environnement *Vensim*⁽²³⁾. L'animateur remet alors à chaque séance du jeu une disquette comprenant un fichier correspondant à un scénario perturbant le système de production. Par exemple, par rapport à des valeurs nominales qui rendent le système stable et équilibré, les perturbations peuvent correspondre à une augmentation des pannes en production, une baisse de motivation du personnel, etc. L'objectif consiste alors à chercher un moyen d'action dans le modèle pour rétablir l'équilibre et concrètement, se rapprocher d'un taux de service de 100 %. Pour des raisons pratiques (limitation de la durée du jeu, souhait de ne pas entrer dans le détail du modèle), les étudiants ne peuvent modifier que les délais de réaction agissant sur neuf variables endogènes que nous avons présentées en figure 1. Pour ce faire, face à une combinatoire importante, il leur est nécessaire d'effectuer une recherche causale et d'agir de manière rationnelle. C'est alors par le jeu que se développe la phase d'apprentissage des méthodes de régulation des systèmes de production contrôlés par des mécanismes cybernétiques non-linéaires et couplés. Pour rendre ce jeu attractif, une compétition est réalisée entre les différents groupes sur la base de deux indicateurs : le temps nécessaire à remonter le niveau de service à près de 100 % et les ressources engagées (valeurs des capacités de production).

Nous montrons maintenant le principe d'utilisation de cet outil

et plus particulièrement la méthode de recherche des causalités dans le modèle. Le modèle utilisé en formation correspond à un système d'assemblage à flux "poussés-tirés". Dans ces systèmes de production, des stocks de produits semi-ouverts sont constitués à partir d'un plan directeur de production suivant une logique de planification de type MRP *Material Requirements Planning* (cf. principe d'Orlicky, 1975). Puis des commandes spécifiques de clients exigent alors un "assemblage" final et une préparation organisés en flux tirés.

L'analyse des divers mécanismes de régulation s'effectue en s'appuyant sur des simulations dynamiques. L'utilisateur peut ainsi découvrir progressivement les relations complexes existant entre les différentes variables par une visualisation arborescente des causes et des effets. Différents scénarios perturbateurs peuvent être simulés (voir les menus d'utilisation du logiciel en figure 3).

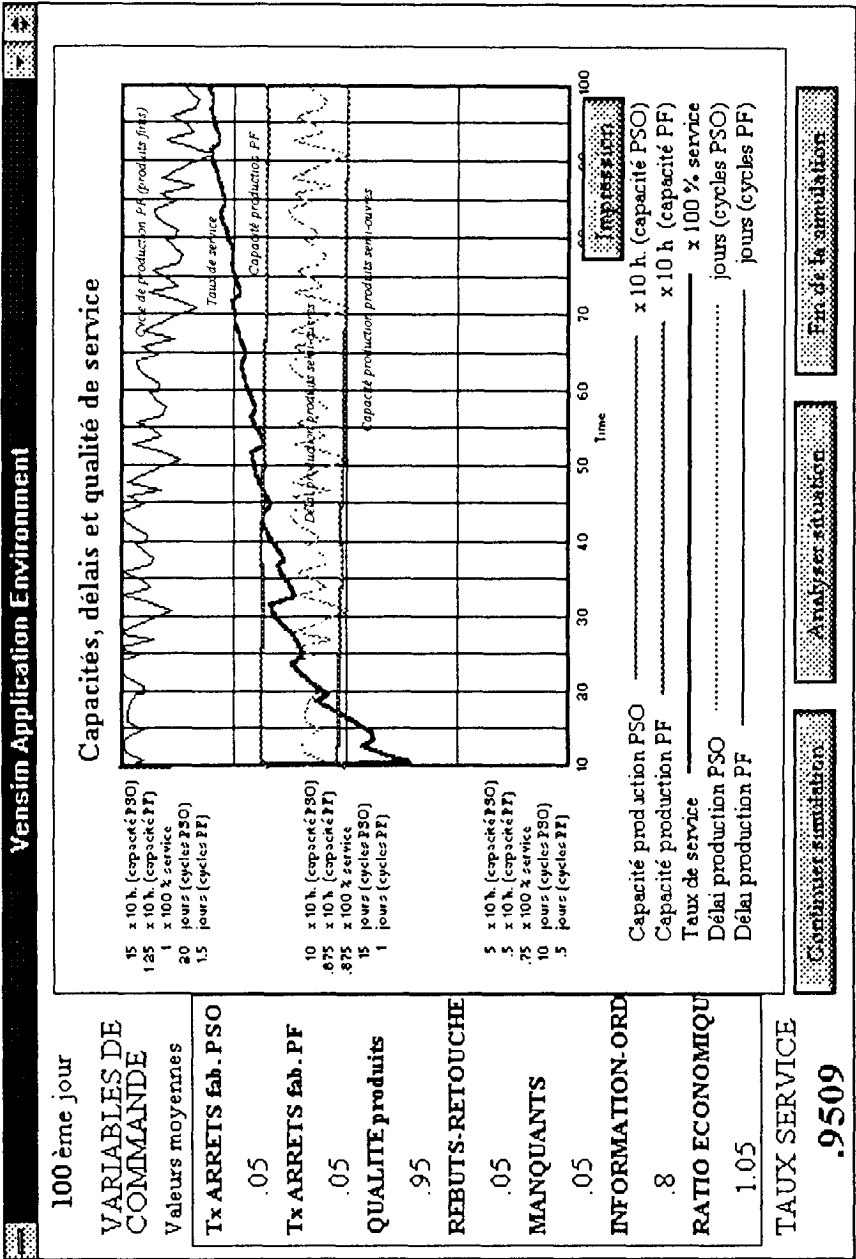
À titre d'exemple, nous présentons un scénario où la qualité de transmission de l'information et des ordres (commandes clients, ordres de fabrication, consignes de production, etc.) se dégrade en passant de 95 % à 80 %. Cette variable qualitative permet d'exprimer l'efficacité des systèmes d'information qui, en cas de baisse, provoque des retards dans la transmission des décisions et par conséquent, une baisse de la qualité du service au client final.

(23) *Vensim* est un produit conçu par *Ventana Systems Inc., Harvard, Cambridge, Ma., USA* et distribué par la société *KBS, Paris, France*.

Figure 3. Configuration du logiciel d'apprentissage

<p>Versim Application Environment</p>	<p>Versim Application Environment</p>
<p>Choix de scénario</p> <p>Entrer le nom de votre scénario (<8 chars)</p> <p><input type="text" value="current"/></p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Lancer le scénario 2 - Modifier les délais de réaction aux incursions 3 - Modifier les taux moyens d'arrêts, quai et rebuts. 4 - Modifier les écart-types des variables 	<p>Modifier le profil des ventes</p> <p>Appui-clavier: le choix de caractère de tous de caractère</p> <p>Commandes préprogrammées par unité de temps</p> <p>Plan de production par unité de temps</p> <p>Hauteur du step positif des ventes à t=10</p> <p>Hauteur du step négatif des ventes à t=10</p> <p>Amplitude sinusoidale des ventes</p> <p>Périodicité des ventes en jours</p> <p>Amplitude bruits dans les ventes</p> <p><input type="text" value="0"/> <input type="text" value="12"/> <input type="text" value="0"/></p> <p>Validation</p> <p>Sortir sans modification de variables</p>
<p>Il vous est possible de faire votre propre scénario d'évolution des variables de commande en y introduisant divers aléas. D'arrêts, par exemple la possibilité de retarder et d'analyser les caractéristiques de l'ensemble des variables d'état du modèle et de modifier vos paramètres (variables de flux)</p>	<p>Ce menu vous permet de modifier le profil des ventes (step positif ou négatif), ou encore les ventes avec sinusoidal et/ou bruits. Attention dans ce cas, il faudra prévoir le mode paramétrage de calculer le taux de service par le rapport entre le cumul des livraisons effectuées sur le cumul des ventes préprogrammées (les nouvelles, sauf en cas d'itérés par erreur) Vous avez la possibilité de sauvegarder ces scénarios avec ces nouvelles données.</p>

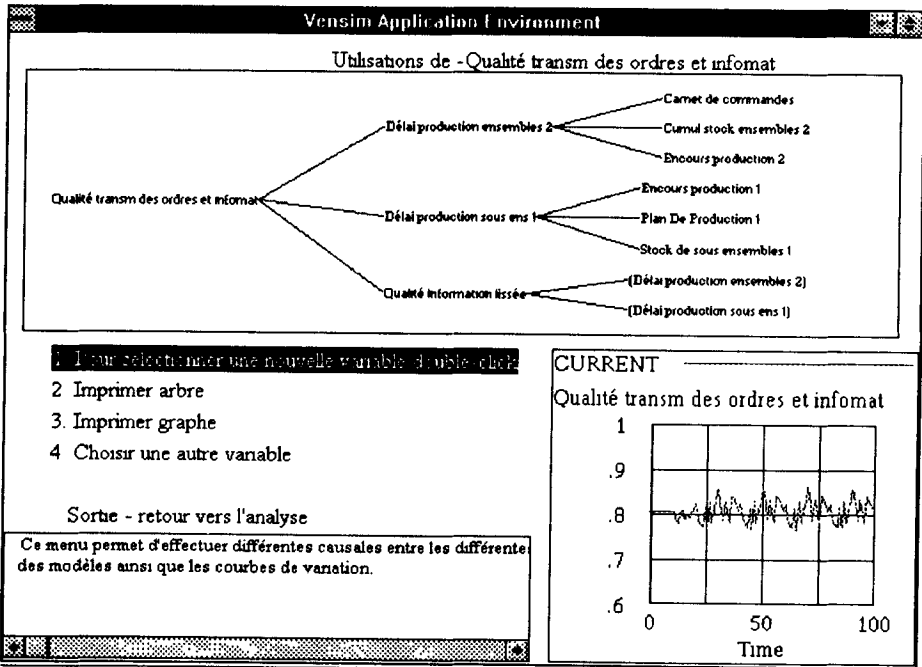
Figure 4. Résultats de simulation 1



En conservant les valeurs nominales des différentes variables internes, les évolutions temporelles des capacités et des délais de production de ce modèle d'assemblage sont présentées dans la figure 4. On peut constater que les capacités de production décroissent légèrement et que le taux de service (rapport entre les quantités prévues et les quantités réellement produites) progresse de 80 % à 95 % en 90 jours. Il est alors nécessaire de prendre des décisions pour améliorer cette situation. En utilisant les fonctionnalités du logiciel, il est possible d'analyser les relations de causalité entre les variables du

modèle. Par exemple, si on souhaite analyser les conséquences de la dégradation de la qualité de transmission de l'information et des ordres, il est possible d'afficher l'arborescence des effets comme le montre la figure 5. Cette variable de commande agit directement sur les cycles de production. D'après la figure 4 précédente, le délai de fabrication des produits semi-ouvrés (PSO) reste stable aux environs de 16 jours. Par contre, le cycle d'assemblage et préparation finale décroît progressivement de 1,5 à 1,3 jours, ceci restant insuffisant pour que le taux de service soit proche de 100 %.

Figure 5. Relations de causalités entre les variables



récente, XI^{es} journées nationales des IAE, Annales du management, Economica, p. 73-86.

Bensoussan, A. (1982), « La recherche en gestion », *Colloque FNEGE*, Nancy, p. 5-29.

Bernstein, D.S. (1996), « Global Change Education », *1996'System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 71-73.

Boorstein, A., Smith, A. (1996), « A Systemic Approach to System Dynamics Education », *1996'System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 82-85.

Boucher, A. (1996), « New Approaches to Learning and Teaching : Student-Centered Modeling », *1996'System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 82-85.

Brabet, D.J., (1993), *Repenser la Gestion des Ressources Humaines ?*, Paris, Economica.

Bridgeland, D., Yu, D. (1996), « A Management Flight Simulator for Strategy Communication and Organizational Alignment », *1996'System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 86-89.

Buckley, W. (1967), *Sociology and Modern Theory*, New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Carena, A. (1996), « Mass Learning : an Application of System Dynamics », *1996'System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 90-93.

Cousinet, R. (1949), *Une méthode de travail libre par groupes*, Paris, Les Éditions du Cerf.

Davidson, P. (1994), « The System Dynamics Approach to Computer-Based Management Learning Environments : Implications and Their Implementation in Powersim » in *Modeling for learning organizations*, Morecroft & Sterman Editors, Productivity Press, Portland, p. 301-315.

de Bono, E. (1976), *Teaching Thinking*, Penguin Books.

Decroly, O. (1929), *La fonction de globalisation et l'enseignement*, Bruxelles, Maurice Lamertin.

Dewey, J. (1968), *Expérience et éducation*, Paris, Librairie Armand Colin (traduction de *Experience and Educa-*

tion, Ohio, Edition Kappe Delat Pi. Heidelberg College, 1947).

Forrester, J.W., « Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st Century », *System Thinking and Dynamic Modeling Conference for K-12 Education (Concord, Massachusetts, USA, 1994)*.

Forrester, J.W. (1969), *Industrial Dynamics*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, p. 344-361.

Forrester, J.W. (1984), *Principes des systèmes*, Presses Universitaires de Lyon.

Forrester, J.W. (1990), « Beyond Case Studies - Computer Models in Management Education », D-4198, *MIT System Dynamics Group*.

Forrester, J.W. (1958), « Industrial Dynamics: A major Breakthrough for Decision Makers », *Harvard Business Review*, Vol. 36, n°4, July-August, p. 37-66.

Freedman, D. (1993), « A "nouvelle" science, "nouveau" management », *Harvard-l'Expansion*, printemps, p. 6-13.

Froebel, F. (1861), *L'Éducation de l'Homme*, Paris, L. Hachette et Cie et Bruxelles, Ferdinand Claass.

Gousty, Y., Kieffer, J-P. (1988), « Une nouvelle typologie pour les systèmes industriels de production », *Revue Française de Gestion*, Juin-Juillet-Août, p. 104-112.

Graham, A.K., Morecroft J.D.W., Senge, P. M., Sterman, J.D. (1994), « Model-Supported Case Studies for Management Education » in *Modeling for learning organizations*, Morecroft & Sterman Editors, Productivity Press, Portland, p. 219-241.

Graham, A.K., Senge, P.M. (1990), « Computer-based studies and learning laboratory projects », *System Dynamics Review*, Vol. 6, p. 100-105.

Haslett, T. (1996), « Three Simulations for Teaching Systems Thinking », *1996'System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 214-216.

Karsky, M., Copin, S., Pitrach, S. (1996), « The Implementation of a Large System Dynamics Model of Human Behavior », *1996'System Dyna-*

mics Conference, Cambridge, USA, July, p. 244-247.

Kaufmann, A., Faure, R., Le Garff, A. (1976), *Les jeux d'entreprises*, Paris, Presses Universitaires de France, Que sais-je ?, p. 71.

Kieffer, J.P. (1986), *Les systèmes de production, leur conception et leur exploitation*, Thèse d'État, Université Aix-Marseille III, p. 40-48.

Leif, J, Rustin, G. (1959), *Pédagogie générale par l'étude des doctrines pédagogiques*, Paris, Librairie Delagrave.

Lugan, J.-C. (1993), *La systématique sociale*, Paris, Presses Universitaires de France.

Lyneis, J.M. (1988), *Corporate Planning and Policy Design : A System Dynamics Approach*, Cambridge, Pugh-Roberts Associates.

Machuca, J.A.D. (1992), « The Need for a New Generation of Business Games for Management Education », *System Dynamics Review*, n°22-1.

Machuca, J.A.D., Machuca, M.A.D., Ruiz, A. et Ruiz, J.C. (1993), « Systems Thinking Learning for Management Education and Transparent Box Business Games. What are our Ideas and how are we Going about it in Sevilla ? », *Second European Congress of Systems Science*, Praha, Czech Republic.

Machuca, J.A.D., Miguel A. D.C. (1996), « Transparent-Box Business Simulators versus Black-Box Business Simulators : an Initial Empirical Comparative Study », *1996 System Dynamics Conference*, Cambridge, USA, July, p. 329-332.

Meadows, D.H. (1989), *Gaming to Implement System Dynamics Models*, Milling et al., p. 635-640.

Mialaret, G. (1983), *Introduction à la pédagogie*, Paris, Presses universitaires de France, Vol. 6, p. 124-134.

Moison, J.-C. (1984), « Recherche en gestion et intervention », *Revue Française de Gestion*, sept-octobre, p. 61-73.

Orlicky, J. (1975), *Material Requirements Planning*, Mc Graw Hill.

Pecquet, P. (1992), « Les méthodes artificielles de la gestion de production et les artifices de représentations des systèmes », *XI^{es} journées natio-*

nales des IAE, Annales du management, Economica, p. 319-328.

Piaget, J. (1970), *Introduction à l'épistémologie génétique*, english version, *Genetic Epistemology*, New York, Columbia University Press.

Reix, R. (1995), *Systèmes d'information et management des organisations*, Vuibert, Paris.

Richardson, G.P. & Pugh, A.L. (1981), *Introduction to System Dynamics Modeling with Dynamo*, Cambridge, Massachusetts, the MIT Press.

Richmond, B. (1990), « System Thinking : Critical Thinking Skills for the 1990s and Beyond », *System Dynamics Review*, n°9, p. 113-133.

Roberts, R.B. (1984), *Managerial applications of system dynamics*, Cambridge, Massachusetts, the MIT Press.

Rousseau, J.-J. (1762), *L'Emile*, livre 3, p. 198, in *Emile ou l'Education*, Gallimard, 1969.

Sekine, K. (1983), *Kanban : gestion de la production à stock zéro*, Éditions Hommes et Techniques.

Senge, P. (1990), *The fifth Discipline : the Art and Practice of the Learning Organization*, New York, Doubleday.

Senge, P., Sterman, J.D. (1992), « System Thinking and Organizational Learning : Acting Locally and Thinking Globally in the Organization of the Future », *European Journal of Operational Research*, Vol. 59, n°1, p. 137 and chapter 8.

Shingo, S. (1983), *Maîtrise de la production - Méthode Kanban - Le cas Toyota*, Les Éditions Organisations.

Simon, H.A. (1960), *The New Science of Management Decisions*, Evanston, Harper and Row, New York, Publishers.

Simon, H.A. (1969), *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, MIT Press, p. 91.

Spencer, H. (1885), *De l'éducation intellectuelle, morale et physique*, Félix Alcan Éditeur, p. 48-64.

Sterman, J. (1988), « Strategy Dynamics - the Rise and Fall of People Express », D-3959-1, MIT System Dynamics Group.

Thiel, D. (1993), *Management industriel, une approche par la simulation*, Paris, Economica.

Thiel, D. (1996), « Analysis of the Behaviour of Production Systems Using Continuous Simulation », *International Journal of Production Research*, Taylor and Francis, Vol. 34, issue 11, p. 3227-3251.

Thom, R. (1972), *Stabilité structurale et morphogénèse*, Paris, Ediscience.

Thomson, J.D. (1967), *Organizations in action. Social Sciences bases of administration Theory*, New York, Mac Graw-Hill Book Co.

Trotter, R.J. and Mc Connel, J. (1980), *Psychologie, science de l'homme*, Montréal, Les Éditions HRW Ltée, p. 185-221 (traduction de Psychology, *The Human Science*, Holt, Rinehart and Wintson, 1978).

Unesco (1981), *L'Éducateur et l'approche systémique. Manuel pour améliorer la pratique de l'éducation*, Paris,

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

Walliser, B. (1977), *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*, Paris, Éditions du Seuil.

Watzlawick, P. (1988), *L'invention de la réalité : contributions au constructivisme*, Paris, Éditions du Seuil.

Wight, O. (1974), *Production and Inventory Management in the computer age*, Van Nostrand Reinhold company.

Wight, O. (1984), *Réussir sa gestion industrielle par la méthode MRP 2*, Éditions de L'Usine Nouvelle.

Williams, L.V. (1986), *Deux cerveaux pour apprendre*, Paris, Les Éditions Organisation (traduction de *Teaching for the two-sided mind*, Prentice Hall).

Woodward, J. (1971), *The structure of Organisations*, Pugh, p. 56-71. Excerpt from *Management and Technology* (HMSO, 1958), p. 4-21.