



RETOUR SUR LES ORIGINES DE LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES ET QUELQUES DIGRESSIONS SUR LES QUESTIONS ECONOMIQUES

Arnaud DIEMER

Revue Francophone du Développement Durable

2024 - n°24 - Octobre
Pages 1 - 16.

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

Pour citer cet article

Diemer A. (2024), Retour sur les origines de la dynamique des systèmes et quelques digressions sur les questions économiques, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°24, Octobre, p. 1 - 16.

Retour sur les origines de la dynamique des systèmes et quelques digressions sur les questions économiques

Arnaud DIEMER

Université Clermont Auvergne, CERDI (CNRS, IRD), ERASME
Post Growth Institute, OPCD
Réseau Français de la System Dynamics Society

Résumé : Dans les années 50, les travaux liés à la cybernétique et aux systèmes de contrôle à rétroaction vont amener certains chercheurs à développer une méthode communément appelée dynamique des systèmes (System Dynamics). J.W Forrester fait partie de ces pionniers qui ont su voir, tout le potentiel de cette méthode. Appliquée à l'industrie et au management (Industrial Dynamics), à la gestion urbaine (Urban Dynamics) ou encore aux problèmes mondiaux (World Dynamics), la dynamique des systèmes est avant tout le regard de J.W Forrester sur le monde qui l'entoure. Dans ces différents ouvrages, Forrester propose une description détaillée de la dynamique des systèmes en insistant sur quatre hiérarchies de structure : (i) une frontière fermée autour du système ; (ii) des boucles de rétroaction comme éléments structurels de base à l'intérieur de la frontière ; (iii) des variables de stocks représentant les accumulations à l'intérieur des boucles de rétroaction ; (iv) des variables de flux représentant l'activité à l'intérieur des boucles de rétroaction. C'est cette méthode qui sera utilisée par les auteurs du rapport Limits to Growth en 1972 et qui fera couler beaucoup d'encre du côté des économistes. Si la dynamique des systèmes a eu très peu d'impacts sur les travaux des économistes, son analyse du mécanisme du Cobweb, du principe de l'accélérateur et du multiplicateur ou encore des cycles longs mérite que l'on s'y attarde.

Mots clés : Boucles, Dynamique des systèmes, Flux, Forrester, Modèles, Stocks

Introduction

Pour de nombreux initiés (Sterman, 2000, 2007 ; Milling, 2007 ; Meadows, 2008, 2023, Lane & Sterman, 2011), la dynamique des systèmes a été développée au MIT dans les années 1950 par J.W. Forrester (2007) : « *After the University, my first year as a research assistant at the Massachusetts Institute of Technology brought another turning point. I was commandeered by Gordon S. Brown, who was the pioneer in "feedback control systems at MIT. During World War II my work with Gordon Brown developed servomechanisms for the control of military radar antennas and gun mounts... At the end of World War II came another turning point. I had about decided either to get a job or start a company in feedback control systems. Gordon Brown again intervened ; he was my mentor for many years at MIT... It was time for yet another turning point. In 1955, James Killian, who was then president of MIT, brought a group of visiting dignitaries to see us at the Lincoln Laboratory. While walking down the hall with Killian, he told me of the new management school that MIT was starting, and suggested that I might be interested. Another turning point in my career and in the development of*

systemdynamics came in 1968, which moved system dynamics from corporate modeling to broader social systems » (2007, p. 346, 347 et 348). Son premier livre, *Industrial Dynamics* (1961), contient les germes d'une méthode qui connaîtra le succès dans les années 1970, notamment à travers le rapport du Club de Rome, *Limits to Growth* (Meadows et ali., 1972). L'article que nous proposons, est composée de deux parties. Dans une première partie, nous évoquerons les principales contributions de J.W Forrester. Conscient que cette méthode devait se généraliser dans les domaines de la santé, de l'environnement, de l'art militaire, de l'économie et du traitement des questions sociales, Forrester professait une formation à la dynamique des systèmes (il s'agit plus précisément d'une combinaison entre System Thinking et System Dynamics¹), dès le plus jeune âge, entre 10 et 12 ans. Selon lui, ce n'était qu'à ce prix qu'il était possible de prendre conscience de la pleine puissance de la méthode. Les apports de Forrester ont fait des émules au sein du MIT et de la Sloan School of Management. Modèles mentaux, structure comportementale des systèmes, boucles de rétroaction et simulations par ordinateur constituèrent les quatre principaux piliers de la dynamique des systèmes et figurent au programme de nombreuses formations. Il reste malheureusement des domaines où la dynamique des systèmes est peu utilisée, voire 'méprisée'. L'économie en fait partie. Les économistes (qu'ils soient orthodoxes ou hétérodoxes) n'ont jamais cherché à tirer profit de cette méthode (Diemer, 2022). Or, la dynamique des systèmes offre un nouveau regard sur le mécanisme du Cobweb, le principe de l'accélérateur et du multiplicateur ou encore les cycles longs. C'est ce que nous présenterons dans la seconde partie de cet article.

J.J Forrester, le père de la dynamique des systèmes²

Industrial Dynamics constitue la première pierre de l'édifice 'forrestien'. Selon Forrester (1961), la dynamique industrielle est une manière d'étudier le comportement des systèmes industriels pour montrer comment les stratégies, les décisions, la structure et les délais d'ajustement sont liés pour influencer la croissance et la stabilité d'une organisation. Ainsi, parler de systèmes "implies a structure of interacting functions. Both the separate functions and the interrelationships as defined by the structure contribute to the system behavior" (Forrester, 1967, p. 1). Pour décrire un système, nous devons décrire non seulement les fonctions distinctes, mais aussi leurs moyens d'interactions : "As used here, a system means a grouping of parts that operate together for a common purpose" (Forrester, 1968a, p. 1). Ainsi, pour identifier la structure d'un système spécifique, il faut comprendre la nature fondamentale de la structure commune à tous les systèmes dynamiques. Dans *Industrial Dynamics*, Forrester a intégré les domaines fonctionnels

¹ « Systems thinking can be a door opener to system dynamics. The danger comes from encouraging people to believe that systems thinking is the whole story. Systems thinking is a sensitizer ; it calls attention to the existence of systems. Some people feel they have learned a lot from the systems thinking phase. But they have gone perhaps only 5 percent of the way into understanding systems » (Forrester, 2007, p. 355).

² Cette partie a fait l'objet de plusieurs publications (Diemer, 2004, 2012, 2018, 2020, 2022).

distincts de la comptabilité, du marketing, de l'investissement, de la recherche, de la gestion de personnel, de la production et de la comptabilité (Forrester, 1968b). Chacune de ces fonctions est ramenée à une base commune en reconnaissant que toute activité économique ou d'entreprise consiste en des flux d'argent, de commandes, de matériaux, de personnel et de biens d'équipement. Ces cinq flux ont été intégrés par un réseau d'information. La dynamique industrielle reconnaît *“the critical importance of this information network in giving the system its own dynamic characteristics”* (Forrester, 1961, p. vii). Forrester considère que la dynamique industrielle a été rendue possible à la suite de quatre avancées notoires : (1) la théorie du contrôle de la rétroaction de l'information, (2) l'analyse des processus de prise de décision, (3) les approches expérimentales de l'analyse des systèmes et (4) l'avènement des ordinateurs.

Un système de rétroaction de l'information existe *“whenever the environment leads to a decision that results in action which affects the environment and thereby influences future decisions”* (Forrester, 1961, p. 14). L'étude des systèmes de rétroaction porte sur la manière dont l'information est utilisée à des fins de contrôle. Elle permet de comprendre comment la nature des actions correctives et les délais entre les éléments interconnectés peuvent conduire à des fluctuations instables. Pour Forrester, les systèmes de rétroaction de l'information présentent trois caractéristiques : (i) *la structure* qui nous indique comment les parties du système sont liées les unes aux autres, (ii) *les délais* qui existent toujours sous la forme de disponibilité de l'information, de prise de décisions basées sur l'information et de mise en œuvre des décisions ; (iii) *l'amplification* qui se manifeste lorsqu'une action engendre des conséquences plus importantes que celles attendues ou présupposées.

Les processus décisionnels ont été mis en place dans les années 50 lors de l'automatisation des opérations tactiques militaires. Pour Forrester, les décisions relatives à la prédiction du contrôle des tirs pendant la Seconde Guerre mondiale ont été prises automatiquement par des machines. Quelques années plus tard, ces décisions automatiques ont été acceptées et mises en pratique. Il était donc nécessaire d'interpréter le jugement tactique et l'expérience de la prise de décision militaire en matière de règles et de procédures formelles : *“It has been amply demonstrated that carefully selected formal rules can lead to short term tactical decisions that excel those made by human judgment under the pressure of time, or with men having insufficient experience and practice, or in the rigidity of large organizations”* (Forrester, 1961, p. 17).

L'approche expérimentale nous rappelle que l'analyse mathématique n'est pas assez puissante pour fournir des solutions analytiques générales à des situations aussi complexes que celles que l'on rencontre dans les entreprises. La simulation est souvent utilisée pour mener des expériences sur un modèle (par exemple, la conception d'un système de défense aérienne ou d'un processus d'ingénierie) : *“Use of simulation methods will not require great mathematical ability. To be sure, details of setting up a model need to be monitored by experts because there are special skills required and pitfalls to be avoided”* (Forrester, 1961, p. 18).

Les ordinateurs sont apparus entre 1950 et 1960. Ces machines à calculer (avec l'augmentation de la mémoire, de la vitesse et de la capacité...) ont permis de traiter des systèmes plus complexes et de les simuler sur le long terme³ (Pugh, 1963).

Ces quatre nouveaux domaines associés à la modélisation d'entreprise ont constitué un terrain propice au développement de la dynamique des systèmes : *“Chance intervened again when I found myself talking to people from General Electric. They were puzzled as to why their household appliance plants sometimes worked three or four shifts and then, a few years later, had to lay off half their staff. ... After finding out how the corporation made hiring and inventory decisions, I started to do some simulation, using a pencil and a page in a notebook. At the top, I put columns for inventories, employees, and orders. Given these conditions and the policies being pursued, one could predict how many people would be hired the following week. This produced a new set of conditions for inventories, employment, and production. It became clear that here was the potential for an oscillatory or unstable system that was entirely internally determined. Even if incoming orders remained constant, employment instability could still arise as a consequence of common decision-making policies. This first pencil and paper inventory control system was the beginning of system dynamics”* (Forrester, 1989, p. 5). Appliquée à l'industrie, la dynamique des systèmes se présente comme une forme de modélisation par simulation informatique qui utilise les concepts de rétroaction de l'information et de variables d'état pour modéliser les systèmes sociaux et explorer le lien entre la structure du système et le comportement évolutif dans le temps (Forrester, 1968a). Pour modéliser le comportement dynamique d'un système, Forrester sera amené à préciser sa pensée à travers deux autres publications : *Principles of systems* (1968) et *Urban Dynamics* (1969).

Dans ces ouvrages, Forrester propose une description détaillée de la dynamique des systèmes et reconnaît quatre hiérarchies de structure : (1) une frontière fermée autour du système ; (2) des boucles de rétroaction comme éléments structurels de base à l'intérieur de la frontière ; (3) des variables d'état représentant les accumulations à l'intérieur des boucles de rétroaction ; (4) des variables de taux (flux) représentant l'activité à l'intérieur des boucles de rétroaction.

Table 1: Four steps in the theory of system structure

A Closed boundary	
1 Feedback loops	
a Levels	
b Rates	
	(1) Goal
	(2) Observed condition
	(3) Discrepancy
	(4) Desired action

Source: Forrester (1967, p. 2)

³ Il faut ajouter à cette émergence du hardware dans les années 50 et 60, celle du Software, particulièrement via les interfaces proposées par des logiciels comme Stella, Powersim ou Vensim dans les années 80.

Forrester insiste tout particulièrement sur la nécessité de délimiter le système que l'on analyse et structurer ce système autour des boucles de rétroaction.

Limite d'un système fermé : pour appréhender la notion de système au sein large, il faut établir la limite à l'intérieur de laquelle se produisent les interactions du système qui lui confèrent son comportement caractéristique. Forrester précise que « la frontière fermée ne signifie pas que le système ne soit pas affecté par des événements extérieurs. Mais cela signifie que ces événements extérieurs peuvent être considérés comme des phénomènes aléatoires qui affectent le système et ne lui confèrent pas en eux-mêmes ses caractéristiques intrinsèques de croissance et de stabilité » (Forrester, 1969, p. 12).

Structure en boucle de rétroaction : Le comportement dynamique des systèmes est généré par des boucles de rétroaction (Roberts, 1975). Une boucle de rétroaction est composée de deux types de variables, appelées variables de taux et variables de niveau. Une boucle de rétroaction est une structure dans laquelle un point de décision - l'équation de taux - contrôle un flux ou un courant d'action. L'action est intégrée pour générer un niveau de comportement du système. L'information sur le niveau est la base sur laquelle le débit est contrôlé.

Fig 1a: Feedback loop

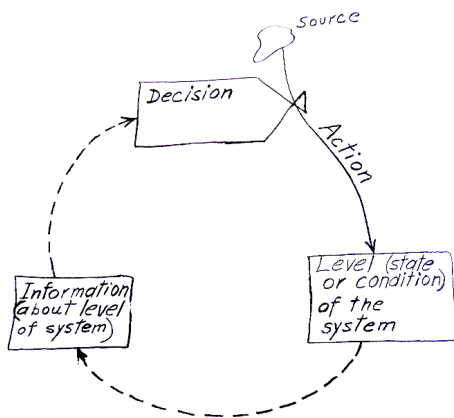
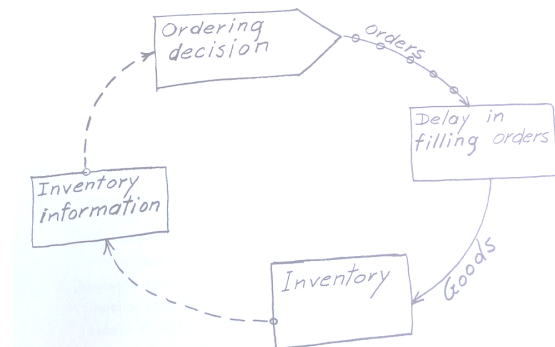


Figure 1b: Inventory Ordering Loop



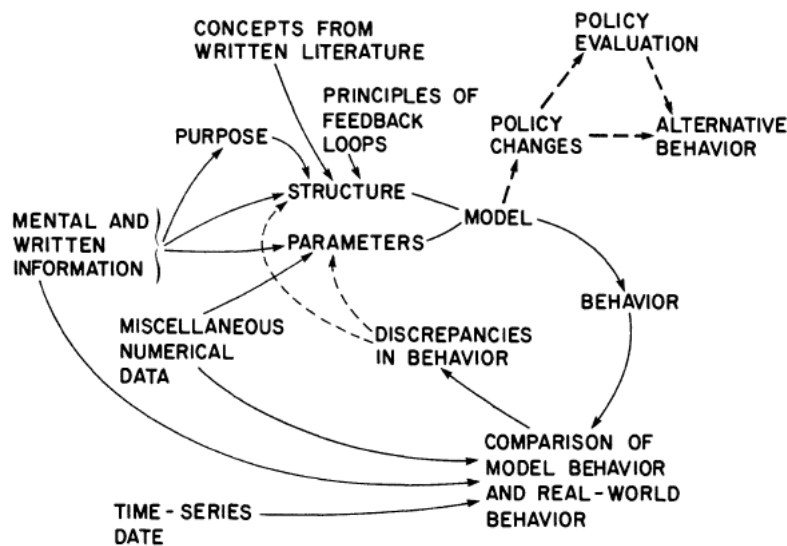
Source: Forrester (1968a, p. 8 – 9)

La figure 1a représente la forme la plus simple de système de rétroaction, il peut y avoir des retards et des distorsions supplémentaires apparaissant de manière séquentielle dans la boucle. Il peut y avoir aussi de nombreuses boucles interconnectées. La figure 1b décrit la structure circulaire de cause à effet de la boucle de rétroaction lorsqu'une entreprise commande des marchandises de remplacement pour maintenir un stock.

L'objectif de la modélisation en dynamique des systèmes est donc d'expliquer le comportement en fournissant une théorie causale (Forrester, 1971b, Forrester, 1979, Lane, Sterman, 2011), puis d'utiliser cette théorie comme base pour concevoir des politiques d'intervention dans la structure du système, qui tentent alors de modifier le comportement ultérieur et d'améliorer les performances (Lane, 2008). Chaque étude en dynamique des systèmes commence par une situation problématique et un

ensemble d'hypothèses utilisées pour décrire cette situation (Goodman, 1974). Ces hypothèses sont considérées comme faisant partie d'un modèle mental de système dynamique (MMDS). Chaque lien de causalité dans un modèle a une polarité, c'est-à-dire la direction de l'effet que la variable influence a sur la variable influencée. La nature de cette influence dépend du type de lien causal considéré. Dans un modèle de dynamique des systèmes, la polarité de chaque boucle de rétroaction est un élément crucial pour comprendre le comportement du modèle. La perturbation d'une boucle peut entraîner l'amplification de l'effet initial, cette réponse instable est connue sous le nom de polarité de boucle de rétroaction positive. Une perturbation peut également être contrée ou résistée par le fonctionnement de la boucle. Cette réponse d'équilibre est connue sous le nom de polarité négative de la boucle de rétroaction.

Figure 2: Creating a System Dynamics Model



Source: Forrester (1975, p. 559)

- *Rôle de la simulation* : l'interaction de ces relations complexes dépasse presque toujours la capacité de l'esprit humain à les déduire, car la simulation mentale est déficiente. La simulation informatique est donc rigoureusement nécessaire pour déduire les conséquences de ces relations et pour révéler le comportement contre-intuitif qui résulte des hypothèses du modèle.

- *Méthodes de diagramme* : Deux méthodes de diagramme sont dominantes dans la communauté de la dynamique des systèmes (Lane, 2008). Les représentations générales des variables et de la structure de rétroaction d'un modèle sont transmises à l'aide de diagrammes de boucles causales (CLD). En revanche, les diagrammes stock/débit (SFD) sont plus détaillés et distinguent les variables d'état et de flux.

A ce stade de la discussion, il est important de souligner deux points importants relatifs à l'utilisation de la dynamique des systèmes :

(i) Si *Industrial Dynamics* (1961) et *Urban dynamics* (1969) ont présenté la dynamique des systèmes comme un modèle de simulation informatique de la croissance, de la

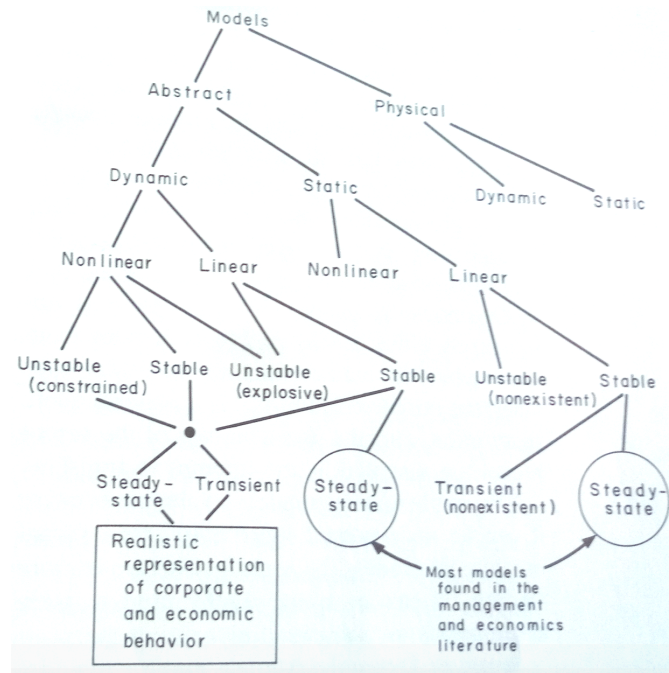
stagnation ou du déclin des ventes d'une entreprise ou des questions de logements dans une ville, c'est parce que l'objectif principal de Forrester était le développement d'un outil destiné à être utilisé par les managers des entreprises et les responsables des politiques urbaines. Mais la dynamique des systèmes est avant tout une méthode « *of dealing with questions about the dynamic tendencies of complex system, that is, the behavioral patterns they generate over time* » (Donella Meadows, 1976, p. 31). La dynamique des systèmes nous aide à « *to learn about dynamic complexity, understand the sources of policy resistance and design more effective policies* » (Sterman, 2000, p. 4). En tant que méthode intégrée à l'interdisciplinarité, la dynamique des systèmes trouve ses racines dans la théorie de la dynamique non linéaire et du contrôle par rétroaction développée en mathématiques, en physique et en ingénierie (Milsom, 1968, Wolstenholm, Coyle, 1983 ; Wolstenholme, 1985). Parce qu'elle permet de comprendre le comportement des êtres humains et des systèmes physiques et techniques, la dynamique des systèmes a été utilisée en sciences sociales et en économie (Morecroft, 1982, 1985). Pour cette dernière, il semblerait que la dynamique des systèmes ait généré un « *conflit de paradigme* » (Diemer, 2004, 2012), avec une autre méthode, l'économétrie (Tinbergen, 1937), développée par les économistes Irving Fisher et Ragnar Frisch dans les années 1930. Cette hostilité peut être due aux personnalités des fondateurs de la méthode (relations entre J.W Forrester et Paul Samuelson au MIT, aucun économiste du MIT n'a participé au projet de recherche *Limits to Growth*, 1972) et à la place qu'occupe l'économétrie dans la formation des économistes (Armatte, 2011). Ainsi, comme le suggère Donella Meadows, « *a closer examination of the two modeling paradigms reveals a deeper division, one that is not easily bridged* » (Meadows, 1976, p. 47). Des mots clés tels que prévisibilité vs imprévisibilité, linéarité vs non-linéarité, quantitatif vs qualitatif, structure ouverte vs structure fermée ... sont des symboles de l'opposition féroce entre les deux approches.

(ii) La dynamique des systèmes se concentre sur les tendances dynamiques générales, « *whether the system as a whole is stable or unstable, oscillating, growing, declining or in equilibrium* » (Meadows, 1976, p. 31). Ainsi, la dynamique des systèmes, en tant que méthode, permet de discuter des fondements théoriques et de l'analyse descriptive des cycles longs. Ce point est développé par Forrester (1977) dans son article « *Growth Cycles* ». Considérant que la plupart des publications sur les cycles économiques se répartissent en deux catégories, soit l'analyse statistique des séries chronologiques passées, soit la spéculation descriptive sur la manière dont les différents aspects du système socio-économique interagissent pour produire un comportement cyclique, Forrester affirme que « *System Dynamics computer simulation models can be used to retain the strength of the descriptive method while overcoming its major weakness* » (1977, p. 525) et pour proposer une nouvelle approche pour tester les théories sur la manière dont la structure et les politiques interagissent pour produire des fluctuations et de la croissance dans un système socio-économique.

La dynamique des systèmes appliquée aux questions économiques

Pour explorer les tendances dynamiques des systèmes, il est nécessaire d'inclure dans les modèles des concepts issus de nombreuses disciplines ou domaines de pensée, en particulier ceux provenant des sciences physiques et biophysiques, des sciences sociales et de l'économie, et d'actualiser les théories à la lumière de nos connaissances sur la structure des systèmes. Dans *Industrial Dynamics*, Forrester considère que les modèles sont « *a basis for experimental investigations* » (1961, p. 49). Les modèles sont aujourd'hui largement acceptés comme moyens d'étudier les phénomènes complexes. Une classification des modèles utilise certains mots clés, abstrait - physique, statique - dynamique, linéaire - non linéaire, instable - stable ou état stable - transitoire.

Figure 3: Classification of models



Source: Forrester (1961, p. 49)

Dans les années 70, Forrester (1975, 1976, 1977, 1980) a examiné les cycles de croissance à partir d'un modèle national. Ce modèle - soutenu par le MIT et le Rockefeller Brothers Fund - visait à intégrer les principaux secteurs de l'activité nationale dans un modèle de simulation dynamique explicite pour étudier le fonctionnement des différentes parties du système socio-économique, la manière dont elles produisent le comportement de l'ensemble du système, et la façon selon laquelle des politiques alternatives pourraient donner lieu à un avenir plus souhaitable. Le modèle se compose de six secteurs (production, finances, ménages, démographie, travail, gouvernement). Ces secteurs décrivent les principaux déterminants de la production, de la consommation, de l'investissement, de l'emploi, des prix, de la politique

gouvernementale... et sont interconnectés par des flux d'informations, de personnes, d'argent, de biens, de services et de commandes. Le modèle national a été conçu pour décrire les processus de développement social et économique national sur une période d'environ 200 ans, de 1850 à 2050. En comparant les études de *Dynamique urbaine* (1969), *Dynamique mondiale* (1971) et *Limites à la croissance* (1972), Forrester, Mass et Ryan (1976, p. 52) ont estimé que le modèle national était "*highly detailed, containing a range of internal structures spanning from short-term inventory management and price setting policies to capital investment policies and long term demographic and environmental forces*". Le modèle était capable de traiter les questions à long terme de la croissance économique, des ressources, de l'énergie, de la population et de l'investissement en capital, ainsi que la dynamique à court terme du cycle économique.

De ce fait, la dynamique des systèmes, en tant que méthode, semble très intéressante lorsqu'il s'agit de revisiter les modèles économiques (Meadows, 1970 ; Low, 1976 ; Sterman, 2000). Nous nous appuyerons ici sur trois exemples : la reformulation du modèle du Cobweb, celle du modèle du multiplicateur-accélérateur et celle des cycles longs

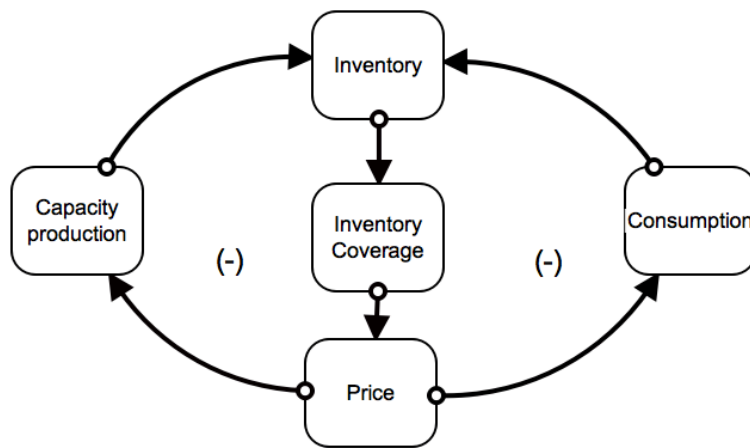
La reformulation du modèle du Cobweb

Dennis Meadows (1970) a proposé une reformulation du modèle Cobweb et introduit un modèle dynamique du cycle des matières premières. Son point de départ est une formulation générale des hypothèses du Cobweb, trois hypothèses sur la production et la consommation : (i) la consommation est une fonction décroissante du prix reconnu par les consommateurs ; (ii) la production est une fonction croissante du prix qui était attendu par les producteurs lorsque la production a été lancée ; (iii) il y a un décalage entre le lancement de la production et la disponibilité de la marchandise qui en résulte.

S'appuyant sur les travaux d'Akerman (1957) et de Nerlove (1958), Meadows considère que la formulation des anticipations adaptatives des producteurs joue un rôle important pour expliquer la stabilité du modèle Cobweb (Skraba & al., 2006). Cette formulation des anticipations est très différente de la décision d'investissement, de l'acquisition d'une capacité de production ou de la maturation (production) de la capacité dans son effet sur la relation dynamique entre le prix et la production. Ainsi, ce résultat « *invalidate the strict one period lagged response assumed in the Cobweb Model and thereby alter the system's stability from that predicted by the Cobweb Model* » (Meadows, 1970, p. 17). Étant donné que les anticipations adaptatives des producteurs entraînent des changements importants dans les conclusions relatives à la stabilité du système du modèle Cobweb, Meadows propose de développer un modèle plus réaliste qui représente explicitement tous les processus liés au prix, à la production et à la consommation : le modèle dynamique du cycle des produits de base. Cette structure repose essentiellement sur deux boucles de rétroaction négative couplées, la consommation et la production, chacune agissant pour ajuster la couverture des stocks

au niveau souhaité. Lorsque les stocks sont inférieurs au niveau souhaité, les prix augmentent. Ces augmentations entraînent des changements dans les secteurs de la production et de la consommation, qui agissent pour ramener les stocks au niveau souhaité. Les augmentations de prix réduisent la consommation par habitant. Avec une consommation moindre, les stocks auront tendance à augmenter. Les relations de production ont le même effet. L'augmentation du prix courant accroît les prévisions de prix des producteurs et donc la capacité qu'ils souhaitent utiliser. Après de nombreux retards, les ajouts de capacité se traduisent par une augmentation de la production et des stocks.

Figure 4: Feedback loop structure of production cycles



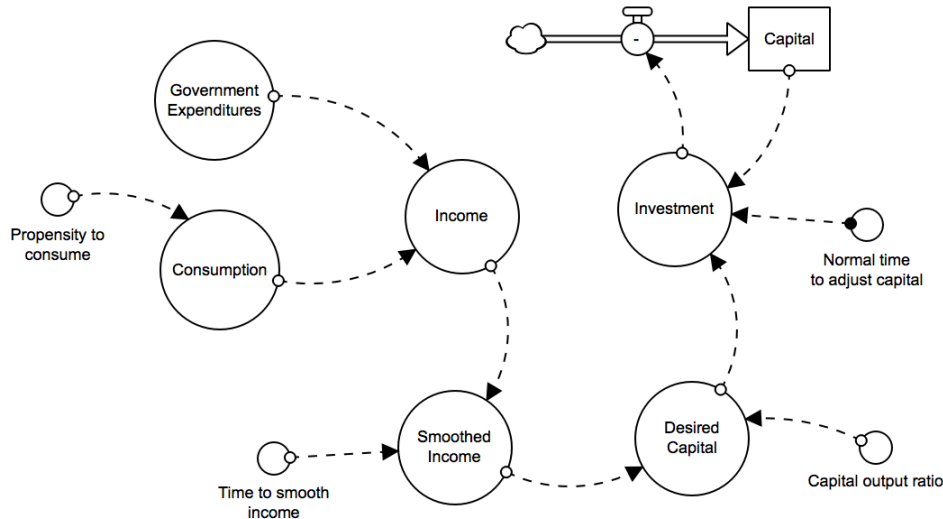
Source: Meadows (1970, p. 19)

Ainsi, dans le modèle dynamique du cycle des produits de base, les producteurs peuvent utiliser n'importe quelle fonction de prix actuels et passés pour former leurs anticipations des prix futurs. L'accent est mis sur les flux réels de marchandises, de capitaux et d'informations. Le modèle comprend un inventaire des produits transformés, qui sert à découpler la production et la consommation à court terme. La production et la consommation sont supposées s'ajuster continuellement aux variations de prix, sans passer brusquement du point d'équilibre d'une période à celui de la période suivante. Le prix est déterminé par ceux qui détiennent les stocks par le biais de l'interaction avec les producteurs et les consommateurs. Lorsque les stocks dépassent le niveau souhaité, ceux qui les détiennent, diminuent le prix pour décourager la production et augmenter la consommation. Lorsque les stocks tombent en dessous du niveau souhaité par ceux qui les détiennent, les prix augmentent. Les délais qui sont importants dans le comportement des systèmes réels de marchandises sont explicitement inclus dans le modèle : (i) production de marchandises, (ii) prévision du prix des producteurs, (iii) prévision de la consommation, (iv) reconnaissance du prix de détail, (v) réponse aux prévisions de prix, (vi) transfert de la capacité de production.

La reformulation du principe du multiplicateur et de l'accélérateur

Low (1980) a proposé de revisiter le modèle multiplicateur - accélérateur pour y inclure les flux d'information / physiques et l'interpréter en termes de dynamique de système.

Figure 5 : Le mode multiplicateur-accélérateur revisité



Le revenu lissé est une valeur lissée exponentiellement du revenu actuel. Ainsi, la consommation actuelle dépend du revenu pondéré de toutes les périodes passées plutôt que du revenu d'une période antérieure indéfinie. Cette formulation « *reflects the continuous process by which consumption habits and standards are gradually adapted to the levels dictated by current income and corresponds to the permanent portion of consumption in Friedman (1957) permanent income hypothesis* » (Low, 1976, p. 83).

La consommation et le revenu lissé constituent des éléments de la boucle du multiplicateur. Cette boucle est positive et la propension à consommer joue un rôle clé. Pour les boucles multiplicatrices, l'investissement, comme la consommation, est lié au revenu lissé dans une boucle positive et au stock de capital dans une boucle négative. Ces deux boucles forment ensemble un système à deux niveaux, qui peut produire un comportement oscillatoire.

Figure 6a: La boucle du multiplicateur

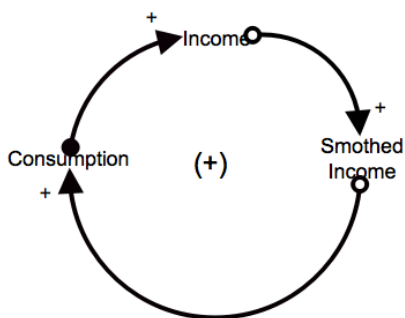
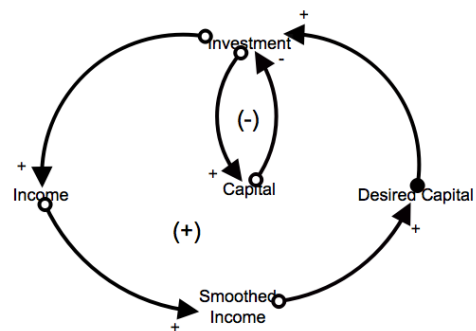


Figure 6b: Les boucles de l'accélérateur



Une reformulation des cycles longs

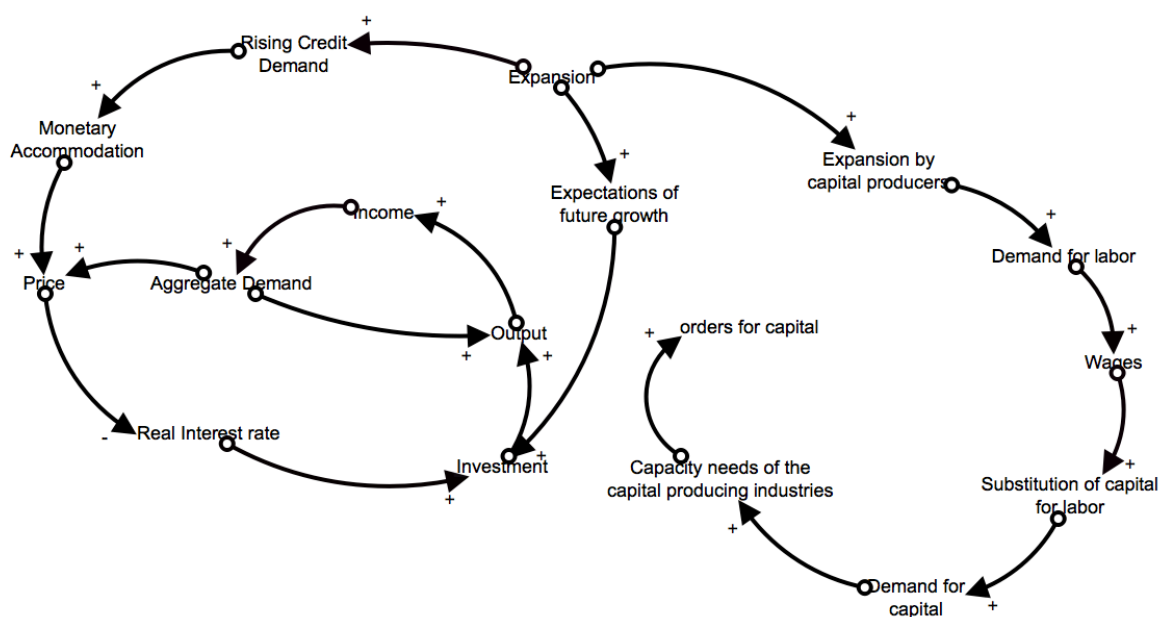
Sterman et Mosekilde (1992) ont proposé un modèle comportemental des cycles longs. Ils considèrent que l'acquisition de capacités de production par les entreprises individuelles implique des processus intrinsèquement oscillatoires. Pris isolément, ces processus sont stables et produisent des oscillations amorties lorsqu'ils sont stimulés par des changements exogènes de la demande. Cependant, il existe un large éventail de boucles d'auto-renforcement dans les liens entre les entreprises et entre les secteurs de la production, de la finance, des ménages et de l'Etat, ce qui déstabilise le cycle et allonge sa durée. Ces boucles sont les suivantes :

(i) La demande de capital augmente les besoins en capacité des industries productrices de capital, ce qui accroît encore les commandes de capital. Ainsi, l'expansion des producteurs de capital augmente la demande de travail et les salaires, ce qui conduit à la substitution du capital au travail et à une demande de capital encore plus importante ;

(ii) L'augmentation de la demande globale stimule les prix, ce qui réduit les taux d'intérêt réels et stimule encore plus l'investissement. L'augmentation de la production stimule les revenus et la demande globale, ce qui accroît encore la production. L'expansion conduit à des anticipations de croissance future, ce qui conduit à de nouveaux investissements et à une croissance de la production ;

(iii) L'augmentation de la demande de crédit pour financer l'essor provoque un assouplissement monétaire, une inflation supplémentaire et des taux d'intérêt réels encore plus bas. On peut observer que ces boucles positives comprennent des processus économiques familiers tels que le multiplicateur keynésien (1936), l'effet Mundell ou la spirale dette/déflation de Fisher.

Figure 7: Les boucles de retroaction et les cycles longs



L'une des rétroactions auto-renforçantes les plus fondamentales est le multiplicateur d'investissement en capital ou l'auto-ordonnement du capital. Si la demande de biens de consommation et de services augmente, l'industrie des biens de consommation doit accroître sa capacité et passe donc des commandes pour de nouvelles usines, machines, véhicules, etc. Pour répondre à ce volume élevé de commandes, le secteur de la production de capital doit également accroître son stock de capital et donc passer des commandes pour davantage de bâtiments, de machines, de matériel roulant, de camions..., ce qui fait que la demande totale de capital augmente encore dans une spirale auto-renforcée d'augmentation des commandes, d'un plus grand besoin d'expansion et d'encore plus de commandes.

Pour Sterman (1985), à l'équilibre, l'effet multiplicateur de l'auto-ordonnement du capital est modeste. Cependant, « *the long wave is an inherent disequilibrium phenomenon, and during transient adjustments the strength of self-ordering becomes much greater than in equilibrium* » (Sterman, Mosekilde, 1992, p. 13). C'est en partie une conséquence de l'accélérateur d'investissement... Une série de boucles de rétroaction positives supplémentaires augmentent encore la demande de capital.

Conclusion

Forrester (1991, 1995, 2007) est revenu à plusieurs reprises sur les années qui se sont écoulés depuis l'émergence des premiers travaux en dynamique des systèmes. Ces années ont montré l'importance d'une meilleure compréhension des systèmes complexes, qu'il s'agisse des écosystèmes ou des sociétés humaines (Forrester, 1981). Ingénieurs, experts des transports, logisticiens, chercheurs en médecine, gestionnaires, managers... toutes ces professions se sont familiarisés avec les concepts et l'approche méthodologique proposés par la dynamique des systèmes (Slate, Ferber, 1968). Il est reste encore beaucoup à faire, les économistes et les sociologues, sont encore loin d'avoir accepté cette méthode (Radzicki, 2011) et les challenges à relever sont nombreux : articuler la dynamique des systèmes avec la pensée systémique dès le plus jeune âge, former des étudiants à la dynamique des systèmes dans une perspective durable (Sustainable System Dynamics Tools), intégrer des interactions de plus en plus complexes (nexus changement climatique, eau, alimentation, énergie et écosystèmes), développer une recherche significative sur les systèmes complexes intégrant des boucles de rétroaction non linéaires d'ordre élevé⁴ (Forrester, 1987).

Dans sa conclusion sur les années passées, Forrester nous rappelait qu'il fallait relever les trois défis suivants : celui de l'éducation des experts, celui de la démarche méthodologique (Diemer, 2023) et celui de la formation dès le plus jeune âge (Boots-Sweeney, Meadows, 2019) : « *As we make our way in the 21st century, the greatest*

⁴ Cela peut renvoyer à l'intégration d'une statistique des valeurs extrêmes, d'algorithmes sophistiqués ou tout simplement de l'intelligence artificielle.

challenges facing system dynamics are related to education. The first challenge involves education of system dynamics experts. The second challenge is to use system dynamics as an organizing philosophy for a new kind of management education in the 21st century. The third challenge is to make system dynamics a common foundation under most of what is taught in pre-college education, from kindergarten through high school. It is time to start working toward an integrated educational process based on an understanding of systems that is more effective, more appropriate to a world of increasing complexity, and more compatible with unity in life » (Forrester, 2007, p. 356).

Références bibliographiques

- ACKERMAN G. (1957), The Cobweb Theorem : A Reconsideration, *The Quarterly Journal of Economics*, vol 71, Issue 1, February, p. 151-160.
- ARMATTE M. (2011). L'économiste dans la Cité : ingénierie et expertise. *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 6(2), 97-131. <https://doi.org/10.7202/1005772ar>
- BOOT SWEENEY L., MEADOWS D.L (1995), *The System Thinking Playbook*, Chelsea Green.
- DIEMER A. (2022), *Fifty Years of Limits to Growth*, Editions Oeconomia.
- DIEMER A. (2022), Immersion dans la dynamique des systèmes, les 15 étapes de la pensée systémique (system Thinking) à la dynamique des systèmes (System Dynamics), *Revue Francophone du Développement Durable*, n°20, décembre, p. 11 – 40.
- DIEMER A. (2020), Modéliser le COVID, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°15, mars, p. 1 – 72.
- DIEMER A. (2018), Business Cycle to 2008's crisis: How System Dynamics can help the economists to understand financial crisis in Alcouffe A., Baslé M., Poettinger M. (eds), *Macroeconomy Theory and the Eurozone Crisis*, Routledge
- DIEMER A. (2012), *Le développement durable vu par les économistes*, Editions Oeconomia.
- DIEMER A. (2004), « Le développement durable et la dynamique des systèmes », *Working Paper* n°2004/05, HERMES, Université de Reims Champagne Ardenne, 24 mai, 20 p.
- FORRESTER J.W (2007), “System Dynamics – a personal view of the first fifty years”, *System Dynamics Review*, vol 23, n°2/3, p. 345 – 357.
- FORRESTER J.W (2007), System Dynamics, the next fifty years, *System Dynamics Review*, vol 23, p. 359 – 370.
- FORRESTER J.W (1995), *The beginning of system dynamics*, Mc Kinsey Quarterly, November, 14 p.
- FORRESTER J.W (1991), *System Dynamics and the lessons of 35 years*, Sloan School of Management, MIT, April 29th, 35 p.
- FORRESTER J.W (1987), “Nonlinearity in High Order Models of Social Systems”, *European Journal of Operational Research*, vol 30, p. 104 – 109.
- FORRESTER J.W (1981), “Innovation and Economic Change”, *Futures*, vol 13, p. 323 – 331.

- FORRESTER J.W (1980), “Information Sources for Modeling the National Economy”, *Journal of the American Statistical Association*, vol 75, n°371, p. 555 – 566.
- FORRESTER J. (1979), *An Alternative Approach to Economic Policy: Macro behavior from Microstructure*, in Kamrany N., Ray R. (eds), *Economic Issues of the Eighties*, Baltimore, John Hopkins University Press.
- FORRESTER J.W (1977), “Growth Cycles”, *De Economist*, vol 125, p. 525 – 543.
- FORRESTER J.W, MASS N.J, RYAN C.J (1976), “The system Dynamics National Model: Understanding Socio-Economic Behavior and Policy Alternatives”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol 9, p. 51 – 68.
- FORRESTER J.W (1976), “Business Structure, Economic Cycles and National Policy”, *Futures*, vol 8, p. 195 – 214.
- FORRESTER J.W (1975), “A National Model for understanding social and economic change”, *Simulation Today*, vol 33, 129 – 133.
- FORRESTER J. W (1975), *Collected papers of Jay W. Forrester*, Waltham, MA: Pegasus Communications. 284 p.
- FORRESTER W. (1971a), *World Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus. 144 p.
- FORRESTER J.W (1971b), “Counterintuitive Behavior of Social Systems”, *Technology Review*, vol 73, n°3, January.
- FORRESTER J.W (1969), *Urban Dynamics*, Waltham, MA : Pegasus Communications.
- FORRESTER J.W (1968a), *Principles of Systems*, Waltham, MA: Pegasus Communications. 391 p.
- FORRESTER J.W (1968b), "Industrial Dynamics - After the First Decade," *Management Science*, vol 14, n°7, p. 398 – 415.
- FORRESTER J.W (1967), “Market Growth as Influenced by Capital Investment”, 9th Annual Paul O. Converse Awards Symposium, University of Illinois, April 13th, 23 p.
- FORRESTER J.W (1961), *Industrial Dynamics*, Waltham, MA: Pegasus Communications.
- GOODMAN M. R. (1974), *Study Notes in System Dynamics*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- LANE D. (2008), The emergence and use of diagramming in System Dynamics: a critical account, *System Research and Behavioral Science*, Vol 25, issue 1, p. 3 – 23.
- LANE D.C, STERMAN J.D (2011), Jay Wright Forrester, chapter 20, in Gass S., Assad A. (eds), *Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators*, New York, Springer, p. 363 – 386.
- LOW G.W (1976), “The multiplier – Accelerator Model of Business Cycles interpreted from a System Dynamics Perspective”, in Randers J. (eds), *Elements of the System Dynamics Method*, MIT Press, 1980.
- MEADOWS D. (1976), *The Unavoidable A Priori*, in Randers J. (eds), *Elements of the System Dynamics Method*, MIT Press, 1980.
- MEADOWS D. H., MEADOWS D.L, RANDERS J. (1972), *The Limits to Growth*. New York: Potomac Associates.
- MEADOWS D. (2023), *Pour une pensée systémique*, Rue de l'échiquier, Paris.
- MEADOWS D. (2008), *Thinking in Systems*, Earthscan, London.

- MEADOWS D.L (1970), *The Dynamics of Commodity Production Cycles*, Cambridge Mass, Wright Allen Press.
- MILLING P.M (2007), A Brief History of System Dynamics in Continental Europe, *System Dynamics Review*, vol 23, p. 215 – 218.
- MORECROFT J. D.W (1982), “A Critical Review of Diagramming Tools for Conceptualizing System Dynamics Models”, *Dynamica*, vol 8(1), p. 20-29.
- MORECROFT J.D.W (1985), Rationality in the Analysis of Behavioral Simulation Models. *Management Science*, 31(7), p.900-916.
- MILSUM J.H (1968), *Mutual Causality in General Systems. In Positive Feedback, a General Systems Approach to Positive Negative/Feedback and Mutual Causality*, Oxford: Pergamon Press.
- NERLOVE M. (1958a). *The Dynamics of Supply : Estimation of Farmers Response to Price*. Baltimore : Johns Hopkins Press.
- NERLOVE M. (1958), “Adaptive Expectations and Cobweb Phenomena”, *Quarterly Journal of Economics* 72 (2), p. 227–240.
- PUGH A. (1963), *DYNAMO User's Manual*, Second Edition. Cambridge, MA: M.I.T. Press.
- RADZICKI M. (2011), *System Dynamics And Its Contribution To Economics And Economic Modeling*, In R. A. Meyers (Ed.), *Complex Systems in Finance and Econometrics*, p. 727-38, New York: Springer.
- RANDERS J. (1976), *Elements of the System Dynamic Method*, MIT Press.
- ROBERTS N. (1975), *Dynamic Feedback Systems Diagram Kit*, Cambridge, Mass.: Pugh-Roberts Associates.
- SKRABA A., KLJAJIC M., KOFJAC D., BREN M., MRKAIC M. (2006), *Cobweb Model in System Dynamics From Hyperincursive Perspective*, University de Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Slovenia, 23 p.
- SLATE D., FERBER R. (1968), *Systems Analysis: Research and Implications for Marketing Urbana*, IL: Bureau of Economic and Business, Research, University of Illinois.
- STERMAN J. D. (2007), “Exploring the next frontier: System Dynamics at 50”, *Special issue of System Dynamics Review*, vol 23 (2-3).
- STERMAN J. D (2000), *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, New York.
- STERMAN J.D, MOSEKILDE E. (1992), “Business Cycle and Long Waves: A Behavioral Disequilibrium Perspective”, *MIT System Dynamics National Model Project*, D – 4308, December, 37 p.
- STERMAN J. D (1985), “A behavioral model of the economic long wave”, *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol 6, (1), p.17-53.
- WOLSTENHOLME E.F, COYLE R.G (1983), “The Development of System Dynamics as a Methodology for System Description and Qualitative Analysis”, *Journal of the Operational Research Society*, 34(7), p. 569-581.
- WOLSTENHOLME E.F (1985), A Methodology for Qualitative System Dynamics. Proceedings of the 1985 International System Dynamics Conference, Keystone, Colorado, p. 1035-1048.