

IMMERSION DANS LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES, LES 16 ETAPES  
DE LA PENSEE SYSTEMIQUE (SYSTEMS THINKING) A LA  
DYNAMIQUE DES SYSTEMES (SYSTEM DYNAMICS)

Arnaud DIEMER

Revue Francophone du Développement Durable

2022 – n°20 – Décembre

Pages 32 - 116.

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

---

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

---

Pour citer cet article

---

Diemer A. (2022), Immersion dans la dynamique des systèmes, les 16 étapes de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (System Dynamics), *Revue Francophone du Développement Durable*, n°20, Décembre, p. 32 - 116.

# Immersion dans la dynamique des systèmes, les 16 étapes de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (System Dynamics)

Arnaud DIEMER

*Université Clermont Auvergne, CERDI, ERASME, Post-Growth Institute*

Résumé : Depuis les travaux de J.J Forrester (1958, 1961, 1969) et plus récemment ceux de Peter Senge (1990) ou Barry Richmond (1997, 2000, 2010), l'analyse systémique s'est constituée autour de deux axes, la création d'un modèle mental (Systems Thinking) et la production d'un modèle quantitatif soumis aux simulations informatiques (System Dynamics). L'article que nous proposons, entend présenter une méthodologie basée sur 16 étapes afin d'amener les apprenants à monter en compétences en dynamique des systèmes. Ces 16 étapes permettent d'une part, de comprendre le passage de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (Systems Dynamics) et d'autre part, de généraliser la dynamique des systèmes à l'ensemble des disciplines. Les dynamiques industrielles, sociales ou territoriales sont alors examinées sous un nouvel angle, l'observation offrant de nouvelles perspectives, notamment dans les écosystèmes territoriaux.

Mots clés : Archétypes, Causalité, Diagramme des boucles causales, Leviers, Systèmes

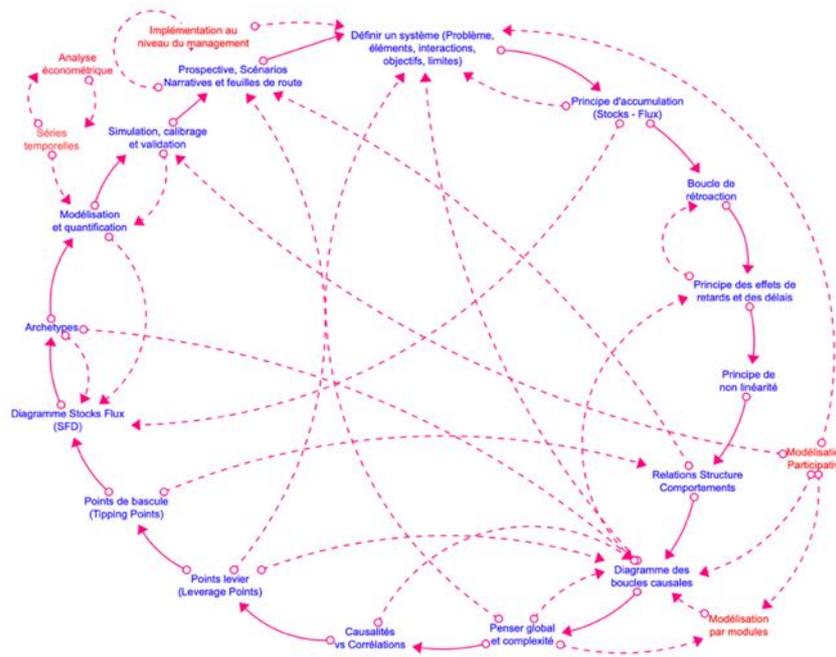
Dans leur ouvrage *The Fifth Discipline Fieldbook*, Peter Senge, Art Keiner, Charlotte Roberts, Richard Boss et Bryon Smith rappelaient que dans une acceptation assez large, « la pensée systémique (traduction française de Systems Thinking) englobe un ensemble de méthodes, d'outils et de principes, tous destinés à examiner l'interdépendance des forces en présence et leur intégration dans un processus commun » (1994, p. 89). De ce fait, le comportement de tous les systèmes suivrait certains principes communs dont la nature nous est progressivement révélée. Barry Richmond (1997) évoque ce qu'il appelle les 7 compétences « critiques » associés à la pensée systémique : « *As you undertake a systems thinking process, you will find that the use of certain skills predominates in each step. I believe there are at least seven separate but interdependent thinking skills that seasoned systems thinkers master* » (1997a, p. 2). Ces 7 compétences s'enchaînaient de la manière suivante : pensée dynamique, pensée système en tant que cause, pensée de l'arbre qui cache la forêt, pensée opérationnelle, pensée en boucles fermées, pensée quantitative et pensée scientifique. En 2010, Barry Richmond récidivait en évoquant 8 compétences en matière de pensée systémique : la pensée à 10 000 mètres, la pensée système en tant que cause, la pensée dynamique, la pensée opérationnelle, la pensée en boucles fermées, la pensée scientifique, la pensée empathique et la pensée générique. Ces compétences devaient, selon lui, « *overcome some formidable obstacles. Primary among these are the entrenched paradigms governing what and how students are taught* » (2010, p. 2). De leur côté, Michael Goodman et Richard Karash (2012) ont cherché à comprendre comment la pensée systémique pouvait être utilisée pour identifier un problème, le résoudre et tester des solutions. Ils ont proposé un processus en 6 étapes : *tell a story* (le point de départ consiste à réunir tous les acteurs importants

de la situation et à demander à chacun d'entre eux de décrire le problème de son point de vue) ; *draw behavior over time graphs* (les graphiques du « comportement dans le temps » permettent de relier le présent au passé et de passer de la vision des événements à la reconnaissance des schémas dans le temps) ; *create a focusing statement* (il s'agit de rédiger une déclaration commune concernant un problème à résoudre, de manière à canaliser les énergies durant tout le reste du processus) ; *identify the structure* (il convient maintenant de décrire les structures systémiques qui créent les schémas comportementaux identifiés, les archétypes de systèmes sont un moyen facile de commencer à élaborer une théorie sur le pourquoi et le comment des choses) ; *going deeper into the issues* (une fois qu'une bonne théorie émerge, il est temps d'approfondir les questions sous-jacentes afin de passer de la compréhension à l'action, quatre questions se posent : le but du système, les modèles mentaux mobilisés, la taille du système et la définition de son propre rôle dans le système) ; *plan an intervention* (utiliser sa connaissance du système pour concevoir une solution qui le modifiera structurellement afin de produire les résultats escomptés). Bien entendu, il existe un biais important, celui de voir la pensée systémique retomber dans les travers d'un processus linéaire. Toutefois, l'apprentissage s'apparente à un cycle, comprendre les conséquences d'une action, observer les résultats, examiner les enjeux d'un point de vue systémique. Nous aurions ainsi le pouvoir de faire évoluer les paradigmes (voir les transcender), encore faut-il exercer ce pouvoir à bon escient et identifier les processus de réflexion, d'apprentissage et de communication constitutifs d'une pensée systémique. Cette dernière consisterait ainsi en deux activités interdépendantes : la construction de modèles mentaux (Doyle, Ford, 1998 ; Johnson-Laird, 1994 ; Gough, 1991) et la simulation informatique de ces modèles afin d'en tirer des conclusions et de prendre des décisions.

Cet article s'inscrit dans le prolongement des travaux de Richmond (1991, 1994, 1997) et plus largement de tous les chercheurs s'intéressant à la pensée systémique (Peterson, 2004, Rapoport, 1986, 1976, Mesarovic, 1967, 1975) et à la dynamique des systèmes (Forrester, 1961 ; 1968, 1969 ; Randers, 1976, Roberts, 1975, Braunschweig, 1985, Karsky, 1980, 1991, 2004, Sterman, 2000, 1986, 1985, Donnadieu, Karsky, 2002, 1993, 1990). Il ambitionne notamment de rendre accessible la pensée systémique et la dynamique des systèmes au public français, en proposant une méthodologie décomposée en plusieurs étapes. La dynamique des systèmes est avant tout une méthodologie permettant de comprendre, de modéliser et d'analyser des systèmes complexes. Elle se concentre principalement sur des boucles de rétroaction, des délais et des accumulations qui déterminent le comportement d'un système (Coyle, 1989). Un modèle en dynamique des systèmes permet d'identifier la structure des systèmes et de prédire l'impact de certains changements dans le temps. Si les travaux en dynamique des systèmes (Forrester, 1961, 1969, Sterman, 2000) insistent tout particulièrement sur les trois éléments suivants : (i) *des diagrammes de boucles causales* (les CLD sont des représentations visuelles des boucles de rétroaction et des chaînes de causalités au sein d'un système) ; (ii) *des diagrammes de stocks et de flux* (les SFD sont

des diagrammes qui montrent les accumulations – stocks – et les taux de changement – flux – au sein d’un système) ; (iii) le *modèle de simulation* (il s’agit d’un modèle informatique réalisé sous Stella, Vensim, Insight Maker ou Powersim Studio) est un modèle informatique qui simule le comportement du système dans le temps (permettant l’expérimentation et l’analyse), il est toujours difficile pour des profanes de monter en compétences en dynamique des systèmes et de se faire les ambassadeurs de cette méthode (Salini, 2017, Thiel, 1996, Arcil, 1984). Il existerait ainsi un véritable dilemme que l’on peut résumer de la manière suivante : « *Tout le monde est conscient que l’analyse systémique est nécessaire cependant peu de personnes sont capables de maîtriser la méthodologie à appliquer* ». Notre article tente de relever ce défi pédagogique en décomposant la dynamique des systèmes en 16 étapes<sup>1</sup> : définition du système (éléments, interactions, objectifs et limites) ; principe d’accumulation (stocks – flux) ; boucles de rétroaction ; principe des effets retard et des délais ; principe de non linéarité ; relation structure – comportement ; diagramme des boucles causales ; penser global et complexité ; causalités et corrélations ; points leviers ; points de basculement ; diagramme stocks flux ; archétypes ; modélisation et quantification ; simulation, calibrage et validation, prospective, scénarios, narratives et feuilles de route. Parmi ces 16 étapes, les 11 premières font directement référence au *modèle structurel qualitatif* (que nous rattachons à l’approche *Systems Thinking*), les 5 dernières renvoient au modèle quantitatif (que nous associons à *System Dynamics*).

Figure 1 : Les 16 étapes de la pensée systémique et de la dynamique des systèmes



Source : L’auteur

<sup>1</sup> En 2004 et 2012, nous avons déjà initié une telle approche. Un ouvrage présentant les grands principes et des exemples de modélisation en dynamique des systèmes est en préparation, il devrait voir le jour fin 2025 : *Initiation à la dynamique des systèmes, Méthodologie, Outils et Applications*. Editions Oeconomia.

Pour tirer pleinement les fruits de cette méthodologie, nous l'avons associée à quatre techniques qui lui donnent une certaine robustesse scientifique. La première renvoie à *la modélisation participative* (System Dynamics Participatory Modeling). Elle permet de faire valider le système et le modèle par un groupe d'experts ou de citoyens. La seconde introduit *une modélisation par modules*. Lorsque le modèle devient trop complexe (nombreuses variables) ou engendre l'apparition de sous-systèmes (population, énergie, alimentation...) dans le modèle, la création de modules « autonomes » permet d'augmenter le niveau de détails à l'intérieur de chaque module, sans pour autant engendrer un modèle compliqué. La troisième intègre *l'économétrie*, qui reste à nos yeux, une technique statistique ou un art (Ouliaris, 2011) et non une méthodologie scientifique<sup>2</sup>. L'économétrie via les séries chronologiques, vise principalement à identifier et estimer statistiquement des problèmes économiques. Elle participe au processus de robustesse statistique d'un modèle en dynamique des systèmes. Enfin, la quatrième et dernière technique concerne *l'implémentation du modèle de dynamique des systèmes* au sein d'une organisation ou plus généralement du management. Il s'agit ici de faire preuve de pédagogie, d'être force de proposition et surtout de convaincre l'auditoire (très souvent son supérieur, voire les dirigeants) de l'opérationnalité du modèle. Si la dynamique des systèmes reste un puissant outil pour « penser système », elle souffre encore d'un manque d'engouement en France, notamment de la part des économistes (Radzicki, 2011).

Précisons ici que ces 16 étapes sont à la fois le fruit de réflexions menées dans le cadre d'un cours de *Modélisation Informatique et Mathématique des Phénomènes Economiques* (MIMPE), proposé à la licence MIASH<sup>3</sup> (Mathématiques et Informatique Appliquées aux Sciences Humaines) depuis 2013, d'un cours d'*Analyse Systémique* dispensé dans le *Master Economies et transitions territoriales* de l'UCA depuis 2017, d'une école d'été « Dynamique des systèmes » Jean Monnet-CNRS (2015 à nos jours), d'un projet européen *Marie Curie*<sup>4</sup> (Adapt Econ II, 2015 - 2019, World 6) et d'une expertise développée dans le cadre des modèles LOOP<sup>5</sup> (Living On One Planet). L'ensemble de ces réflexions a fait l'objet de nombreuses publications (Diemer, 2004, 2012, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022).

---

<sup>2</sup> Nous reviendrons sur ce point plus tard. Toutefois, nous avançons ici l'idée que les travaux des économistes souffrent d'un excès d'économétrie et bien souvent, la plupart confondent technique et méthodologie. Si l'économétrie peut apporter une certaine robustesse statistique à la conception d'un modèle, en revanche, elle ne peut constituer à elle-seule une méthodologie, notamment lorsque les systèmes sont de plus en plus complexes et qu'ils deviennent non linéaires.

<sup>3</sup> Je tiens à remercier Derek Chan, Nathalie Spittler, Ganna Gladkykh et Eduard Nedelciu qui ont à la fois participé à ces enseignements ou indirectement apportés leur pierre à l'édifice.

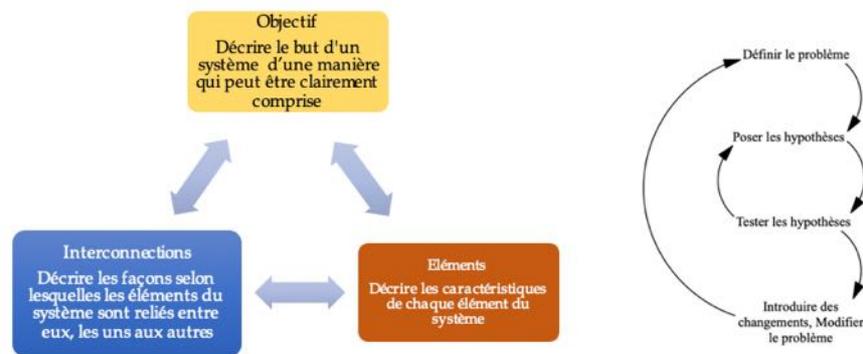
<sup>4</sup> AdaptEcon II visait à produire un modèle du type World 3, en y intégrant différents modules (acier, climat, énergies renouvelables, pêcheries...). Les séances de training et les discussions méthodologiques avec mes collègues islandais (Vala Ragnarsdottir, Harald Sverdrup, Brynhildur Davidsdottir), suédois (Ingrid Stjernquist, Peter Schlyter) et anglais (Jenneth Parker) ont été d'une grande aide.

<sup>5</sup> Ces travaux m'ont permis de développer des modèles de dynamique des systèmes au niveau global et macro (IAM LOOP - iSDG France), méso et micro (IATBLOOP) et pour la mise en place d'une économie circulaire (CELOOP). Ces travaux ont été récompensés en 2021 par le prix de l'Académie 20-25. <https://www.youtube.com/watch?v=6t6QvNlysKY>

## Définir un système, ses éléments, ses interactions, ses objectifs et ses limites (étape 1)

Il est difficile d'aborder la pensée systémique et plus précisément la dynamique des systèmes sans mentionner les travaux de J.W Forrester (1958, 1961, 1968, 1969). Dans *Industrial Dynamics* (1961), Forrester rappelle que 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 étroitement liés lorsqu'il s'agit d'analyser et de comprendre la croissance et la stabilité d'une organisation. Ainsi, parler de systèmes, implique « *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 et le but recherché : « *As used here, a system means a grouping of parts that operate together for a common purpose* » (Forrester, 1968a, p. 1). Pour identifier la structure d'un système spécifique, il faut comprendre la nature fondamentale de la structure commune à tous les systèmes dynamiques. L'un des grands avantages de la pensée systémique est qu'elle nous aide à décrire ce qui est (ensemble de causalités) à l'intérieur d'un périmètre délimité (ce sont les limites du système). La pensée systémique s'avère utile et pertinente pour résoudre des problèmes complexes (figure 2).

Figure 2 : Penser systèmes et processus mental



Source : Diemer (2020)

Utile, parce que c'est une façon simple de décrire l'objectif (d'une manière qui peut être clairement comprise par tout le monde), les éléments (caractéristiques du système) et les interconnexions (la façon dont les éléments ou les caractéristiques s'alimentent les uns les autres et sont en relation les uns avec les autres). Pertinent, car elle donne une image claire du processus mental qui nous amène à poser les termes d'un problème. Tout d'abord, on précise le problème ou la question que l'on souhaite résoudre ou poser. Ensuite, on pose des hypothèses pour expliquer le problème et les tester à l'aide de modèles mentaux et de modèles de simulation informatique. Lorsque on est satisfait du résultat, il est possible de communiquer avec clarté ce que l'on a trouvé et d'engager un processus de changement (de comportement).

La notion de modèle mental occupe ainsi une place centrale dans la dynamique des systèmes (Forrester, 1992, Karsky, 1991, Donnadiou, Karsky, 1990, 1993). Johnson-Laird (1980, 1993, 1994) considère qu'un modèle mental est une « *représentation interne d'un état de choses (state of affairs) du monde extérieur* » (1993, p. 1). Il s'agirait d'une forme de représentation des connaissances qui fait directement référence à la façon naturelle par laquelle l'esprit humain construit la réalité, en conçoit des alternatives et vérifie des hypothèses, lorsqu'il est engagé dans un processus de simulation mentale. Dans l'ouvrage *Industrial Dynamics* (1961), Forrester aborde clairement cette question. Le processus mental qui s'attache à modéliser, est essentiel : « *A mental image of a verbal description in English can form a model of corporate organization and its processes. The manager deals continuously with these mental and verbal models of the corporation. They are not the real corporation. They are not necessarily correct. There are models to substitute in our thinking for the real system that is represented* » (Forrester, 1961, p. 49).

Dans deux articles intitulés *Counterintuitive Behavior of social systems* (1971) et *Policies, decisions, and information sources for modeling* (1992), Forrester apporte quelques précisions sur les caractéristiques et les limites des modèles mentaux<sup>6</sup> :

« *The mental model is fuzz. It is incomplete. It is imprecisely stated. Furthermore, within one individual, a mental model changes with time and even during the flow of a single conversation* » (Forrester, 1971, p. 213).

« *People are not good calculators of the dynamic behavior of complicated systems. The number of variables they can in fact properly relate to one another is very limited. The intuitive judgment of even a skilled investigator is quite unreliable in anticipating the dynamic behavior of a simple information-feedback system of perhaps five or six variables. Such failure to anticipate behavior is true even when the complete structure and all parameters of a system are fully known). The mental models used to explain behavior of industrial and economic systems usually do not rank in complexity beyond a fourth order differential equation. People think they give consideration to a much larger number of variables, but I doubt that these are properly related to one another in groups larger than a few at a time* » (Forrester, 1992, p. 48).

De manière générale, tous les modèles de dynamique des systèmes commencent par problématiser une situation et définir un jeu d'hypothèses permettant de décrire ladite situation (Goodman, 1974). Ces hypothèses sont considérées comme faisant partie d'un modèle mental de dynamique des systèmes (MMDS<sup>7</sup>), susceptible de définir

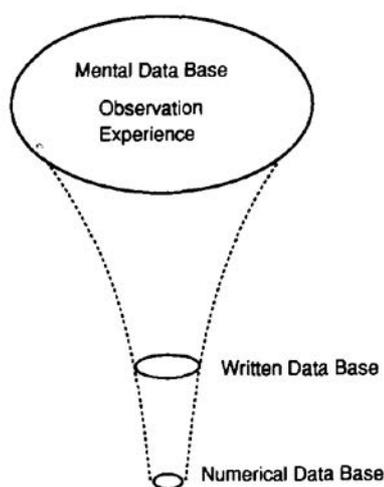
---

<sup>6</sup> Les contributions de Peter Senge (1990) et John Sterman (1994) doivent être également mentionnées ici. Pour Senge, les modèles mentaux « *are deeply ingrained assumptions, generalizations, or even pictures or images that influence how we understand the world and how we take action. Very often, we are not consciously aware of our mental models or the effects that have on our behavior* » (1990, p. 8). Selon Sterman, le terme de modèle mental « *stresses the implicit causal maps of a system we hold, our beliefs about the network of causes and effects that describe how a system operates, the boundaries, of the model (the exogenous variables) and the time horizon we consider relevant – our framing or articulation of a problem* » (1994, p. 294). Voir également Sterman '1989a, 1989b et 1989c).

<sup>7</sup> Doyle and Ford proposent qu'un modèle mental de dynamique des systèmes soit « *a relatively enduring and accessible, but limited, internal conceptual representation of an external system whose structure maintains the perceived structure of that system* » (1998, p. 17). Dès lors, un modèle mental peut inclure de la

l'objectif, la structure (on parle bien ici de modèle structurel et non de modèle simplifié<sup>8</sup>) et les paramètres du modèle (les paramètres d'un modèle sont des éléments fondamentaux qui définissent le comportement et les fonctionnalités des modèles). Dans le processus de modélisation en dynamique des systèmes, les flux d'informations sont de façon continue convertis en décisions et en actions. L'information constitue un input dans la prise de décision, au point que cette dernière produit une action qui elle-même crée une nouvelle information. On parle ainsi de « *Information feedback system* » (Forrester, 1992, p. 43). Si toute l'information disponible doit être mobilisée, Forrester suggère l'existence de trois types de bases de données : (i) les informations mentales liées à l'observation et l'expérience (les plus nombreuses), (ii) les informations écrites et (iii) les informations numériques.

*Figure 3 : De l'information à la base de données*



*Source : Forrester (1992, p. 56)*

Les informations mentales que nous mobilisons grâce à l'observation et l'expérience<sup>9</sup> sont particulièrement nombreuses dans le processus qui conduit à la conception d'un modèle. Ce modèle est avant tout structurel (hypothèses, relations fonctionnelles...), il embrasse toute la complexité du problème rencontré et fait le point sur les connaissances de l'expert (nous devrions plutôt dire l'équipe d'experts). A travers ces informations mentales, le modèle devient également le lieu de discussions et d'échanges entre des personnes ayant des postures différentes (les pous, les contre). La dynamique des systèmes s'appuie sur une approche bottom-up.

---

connaissance et des croyances (auxquelles on accorde un certain degré de confiance), une structure cognitive (existence de représentations mentales permettant de l'introspection), des limites (c'est la taille maximale et la complexité du modèle mental, la rationalité limitée au sens de Simon, 1956, mais également la taille minimale à partir de laquelle on puisse parler de modèle mental, un système clos peut se limiter à deux boucles, exemple de la boucle naissances - population - décès).

<sup>8</sup> C'est bien ce qui différencie ici les modèles de dynamique des systèmes des modèles économétriques des économistes, qui postulent au préalable, l'existence d'un modèle simplifié.

<sup>9</sup> On ne le répétera jamais assez mais l'expertise en dynamique des systèmes ne peut s'acquérir sans l'observation et l'expérience... C'est en concevant des modèles et en répétant ces gestes régulièrement que nous parvenons à comprendre le fonctionnement des systèmes complexes.

Forrester classe les informations mentales en trois catégories : (1°) La première catégorie tient compte des observations sur la structure du modèle et les incidences possibles en matière de politique économique. Il s'agit de comprendre comment les individus agissent ainsi ? De quelle manière les différentes parties du système social sont interconnectées (passage de l'individu au groupe, puis à la société) ? (2°) La deuxième catégorie précise que les attentes en matière de comportement du système sont des simulations mentales qui représentent les conséquences des informations détaillées dans la catégorie 1. Les attentes en matière de comportement peuvent prendre la forme de solutions intuitives, d'équations mathématiques (intégration de second ordre) ; (3°) La troisième catégorie revient sur les observations passées du comportement du système. Une analyse de ces observations passées peut révéler les symptômes du problème actuel et conduire à la conception d'un nouveau modèle mental ;

La base de données écrites constitue une extrapolation de la base mentale, elle contient également une présentation des concepts, des hypothèses et des abstractions susceptibles d'éclairer le modèle mental. Si le modèle mental reste avant tout une opération individuelle ou collective qui vise à donner du sens à certaines idées, il peut également générer de nombreuses formes de représentations. La base de données écrites est là pour retrouver une sorte de consensus, inscrire les hypothèses dans un cadre structurel et permettre le passage de l'information à la décision. A ce niveau, il n'y a plus de débats possibles, mais un cadre de référence. Les perceptions et les représentations du modélisateur sont passées par une sorte de filtre afin de devenir connaissance commune<sup>10</sup>. La base de données numériques constitue la partie étroite de l'entonnoir, elle souligne - contrairement aux idées reçues - que les données mobilisées pour un modèle d'aide à la décision, ne sont pas aussi importantes que ce que l'on pourrait prétendre (notamment vis à vis de la base de données mentales). Par ailleurs, il ne s'agit plus de débattre sur les relations de cause à effet, mais d'élargir le cadre aux séries statistiques et aux tests de corrélation... La base de données numériques permet de recueillir l'information nécessaire pour quantifier certains paramètres du modèle (on peut ainsi chercher à paramétrer la propension à épargner<sup>11</sup>) et introduire des séries temporelles. Ces deux dernières remarques méritent quelques commentaires : (1°) La prédominance de la causalité sur la corrélation en dynamique des systèmes, notamment lorsque l'on étudie des phénomènes non linéaires et complexes (étapes 5, 7 et 8) ; (2°) L'opposition marquée entre la dynamique des systèmes et l'économétrie (voir étape 7 et technique économétrique) que Forrester a résumé de la manière suivante : « *In System Dynamics*

---

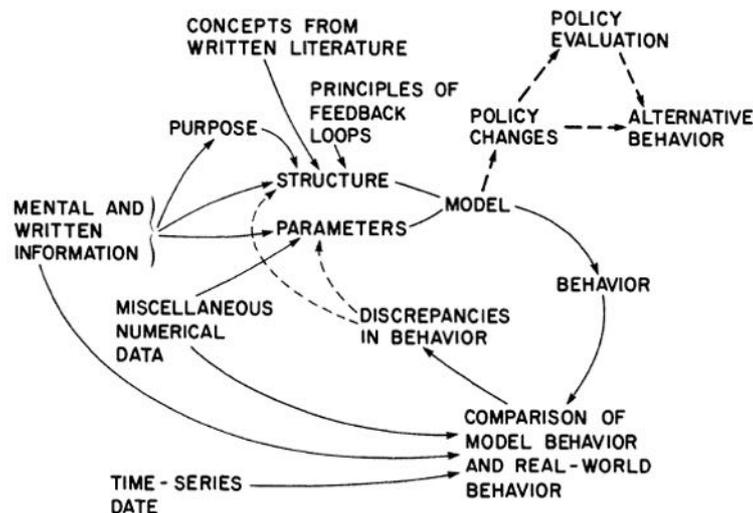
<sup>10</sup> Forrester (1992, p. 57) s'appuie sur l'exemple de la fonction de production Cobb-Douglas, très utilisée par les micro-économistes. Il note que cette fonction est très liée au concept de productivité marginale des facteurs de producteurs, or « *such concepts are seldom explicitly recognized by practicing management and would not emerge from discussions with those who make economic decisions* ».

<sup>11</sup> Dans le cas de la France, le taux d'épargne a été longtemps compris en 15 et 16%. A la suite de la crise de la Covid, il a atteint les 22 et 23%.

modeling, time-series data are used much less as the basis for determining parameter values than econometric models. But in System Dynamics, the simulation model itself generates synthetic output time series data that can be compared in a variety of ways with the real time-series data. I believe this independent use of time-series data for validating model behavior is less vulnerable to errors in the data than is the econometric use of data for trying to derive meaningful parameters » (1992, p. 58).

Durant les différentes phases de l'étape 1, la construction du modèle est centrée sur les informations mentales et écrites, le système étudié répond à une problématique, et un objectif lui est assigné (fonction de performance). La structure du modèle repose sur une triple convergence, (i) une revue de la littérature pour définir les hypothèses et les concepts, (ii) la mobilisation des boucles de rétroactions pour décrire la dynamique (étape 3) et (iii) la définition des paramètres (pour intervenir à différents points du système). Le modèle structurel ainsi établi permet de poser les bases d'un processus dynamique, dans lequel un comportement va émerger. Les informations numériques, la diversité des variables mobilisées, les biais potentiels et les séries temporelles vont permettre de comparer le modèle avec la réalité (même si l'observation consiste à partir de la réalité). Chaque biais sera évalué et pourra faire l'objet d'une correction du modèle. Ce n'est qu'à la fin de ce processus, qu'il sera possible de passer à l'échelle de la politique économique (information, décision, action) et d'imaginer les changements que l'on peut induire...

Figure 4: Créer un modèle de dynamique des systèmes



Source: Forrester (1975, p. 559, 1992, p. 59)

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 (Coelho, Diemer, Morales, 2017) : (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.

*Tableau 1: Four steps in the theory of system structure*

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

*Source: Forrester (1967, p. 2)*

La délimitation du système étudié (closed boundary) est donc primordiale ici. En effet, 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 n'est 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).

Pour résumer cette première étape et inscrire la dynamique des systèmes dans une démarche méthodologique, les points suivants méritent une attention particulière. (i) La dynamique des systèmes permet de comprendre le fonctionnement de modèles complexes (d'où la nécessité d'observer le système que l'on analyse, d'identifier les entités qui composent ce système, de souligner leurs interactions, de présenter ces entités sous la forme de variables, d'appréhender les drivers – c'est-à-dire les variables qui sont à l'origine des principales interactions, qui impulsent la dynamique -, d'exposer clairement le problème auquel on souhaite répondre, d'exposer les hypothèses que nous sommes amenés à formuler, de bien préciser les limites du système – en sachant que ces limites sont mouvantes, notamment lors de la conception des boucles de rétroaction). Notons ici que le passage à la dynamique des systèmes ne peut être compris, sans faire un détour par ce que l'on a coutume d'appeler *Systems thinking* (Goodman, 1997)<sup>12</sup>. La méthodologie Systems Thinking suppose d'avoir identifié les entités, les interactions entre ces mêmes entités, les fonctions (processus) et la performance des systèmes que nous analysons (la résolution de problèmes complexes passe par l'amélioration de la performance du système). (ii) La dynamique des systèmes impose une forme de simplification car tout système complexe nous

<sup>12</sup> Goodman (1997, p. 6) insiste sur le fait que Systems Thinking est à la fois une philosophie, une forme de sensibilisation à la nature circulaire du monde dans lequel nous vivons, une prise de conscience du rôle de la structure dans un système, une reconnaissance de la puissance des lois opérant dans un système...

oblige à rester humble devant la tâche à accomplir (nous y reviendrons lorsque nous aborderons l'étape de la complexité). (iii) La dynamique des systèmes nous aide à clarifier notre pensée, c'est une manière de s'ouvrir aux autres et d'amorcer une sorte de modélisation participative (nous verrons plus loin que la dynamique des systèmes est une approche transparente et qu'elle conduit à partager ses modèles dans une communauté d'apprenants).

*D'un point de vue plus formel*, cette première étape impose de définir une problématique (exemple : développer une alimentation de qualité sur un territoire) et de traduire le problème identifié en challenges (une juste rémunération pour les producteurs, des produits biologiques pour la santé des consommateurs, une agriculture de proximité et en circuit court...). Tous ces challenges vont permettre de visualiser les limites (spatiales, temporelles...) de la problématique et de cartographier le système étudié (ici le système alimentaire). Cette étape constitue un long processus de recherche d'informations (lecture de rapports, d'articles scientifiques, consultation d'experts...). Nous recommandons aux néophytes en dynamique des systèmes, de synthétiser ces informations dans un **click-chart**<sup>13</sup> (poster regroupant les données qualitatives et quantitatives recensées et permettant de discuter avec un auditoire). Ce poster que l'on associera plus tard aux diagrammes de boucles causales (CLD) et aux diagrammes stocks - flux (SFD) permet de dissocier ce que Zagonel et Corbet qualifient de « *System Mapping* » et de « *Hypothesis testing* ». (2006, p. 6). En effet, la modélisation par test d'hypothèses est centrée sur le problème à résoudre et non sur le système. Il existe donc un accord (notamment dans le cadre d'une démarche participative) sur la question posée ou le problème rencontré.

L'identification d'un problème va ainsi permettre de tester un **jeu d'hypothèses** (c'est ce jeu d'hypothèses qui va nous dire si la structure qualitative - modèle mental - du système est susceptible d'expliquer un comportement particulier). Si l'hypothèse est vérifiée, alors le modèle structurel prend forme, si l'hypothèse est réfutée, alors il conviendra de redéfinir les hypothèses de travail. Précisons deux choses importantes : (1) tant que les hypothèses n'ont pas été formulées, il n'est pas possible de s'engager dans une modélisation quantitative (l'effort doit donc porter sur la qualité du modèle structurel). ; (2) c'est à la suite de la formulation des hypothèses que l'on parvient à identifier les variables clés du système (les variables à l'origine des grandes tendances, les fameux drivers, les variables entrant en interactions, les variables endogènes, les variables exogènes, les paramètres ainsi que des variables que nous avons choisi de rejeter) à l'aide d'un tableau et d'une représentation type **Bull's eye** (Shinkle & al., 2023, Pieper, Klein, 2007, Pruyt, 2013, 2007, 2004) . Concrètement, la dynamique des systèmes part d'une question « *Problem oriented* » (Lorenz, 2009) pour aller vers une solution « *System oriented* » dans laquelle le comportement dynamique du « modèle » est caractérisé (Hurst, Walker, 1972, Klir, 2013).

---

<sup>13</sup> <https://clickcharts-flowchart-software.en.softonic.com>



Cette première formulation du système impose de lister toutes les variables du système et de préciser leur statut (Salini, 2017), en sachant que nous souhaitons nous représenter un système qui parle de la croissance économique (et donc de l'augmentation du PIB). Dans le cas présent, la consommation des ménages est un driver, c'est à dire une variable susceptible d'expliquer l'évolution du PIB. Le revenu des ménages est une variable endogène qui explique la consommation des ménages. Mais ce n'est pas ici le driver du système. L'héritage est une variable qui influence le revenu et générateur de profondes inégalités. L'héritage est donc une variable qui fait partie du système Croissance économique mais qui est omise dans le modèle présenté (variable rejetée dans le bull eyes). Comme le rappelait fort justement Forrester « *Such omissions happen because of necessity of simplification. However, omitting a variable from a policy in a model is the omission of an input that may be correlated in time with decisions created by the policy* » (1975, p. 55).

## Le principe d'accumulation, des stocks et des flux (étape 2)

Cette deuxième étape est l'un des principes de base de la dynamique des systèmes (Meadows, 2008), elle est généralement rattachée au diagramme stock et flux (SFD pour Stocks and Flows Diagram) qui intervient après le diagramme des boucles causales (CLD pour Causal Loops Diagram) et le modèle mental. Tous les modèles s'appuient sur une représentation stocks - flux pour appréhender des phénomènes observés. Il s'agit ici de préciser les contours et les caractéristiques de ce que nous pourrions appeler le principe d'accumulation<sup>14</sup>. *Cette deuxième étape consiste à identifier ce qu'est un flux et un stock, et à concevoir un premier tableau permettant d'identifier les variables du modèle.* Notons que cette distinction n'est pas toujours évidente. Prenons le cas des voitures, lorsqu'elles se déplacent et qu'elles sont en mouvement, elles constituent des flux qui entrent et sortent des villes. Toutefois, lorsque les flux entrants sont trop importants, cela crée des bouchons, et les voitures sont dès lors stockées sur la voie, empêchant toute régulation. De la même manière, les voitures sont des flux au regard du temps de déplacement. Mais si l'on rapporte le temps de déplacement au temps de stationnement, les voitures deviennent des stocks qui nécessitent des infrastructures (parkings souterrains, garages, voies de stationnement...).

D'un point de vue général, un stock est mesuré à un moment précis, il représente une quantité<sup>15</sup> qui s'est accumulée au cours du temps (passé vers le présent). A l'inverse, le déstockage traduit une réduction du stock sur une période donnée. Un flux est mesuré sur un intervalle de temps. Les différentes unités de temps (heure, jour,

---

<sup>14</sup> En fait, derrière le processus d'accumulation, il y a un phénomène de recharge et de décharge des stocks (exemple de la constitution des nappes phréatiques). Toutefois, nous partons du principe que les stocks doivent d'abord s'accumuler pour être ensuite réduits. Si un stock négatif est possible en économie (exemple de la dette publique), en revanche, il conduirait à un épuisement des ressources dans le monde biophysique.

<sup>15</sup> Précisons que le stock n'est pas automatiquement physique, un stock de connaissances est une sorte de capital humain qui augmente les compétences d'un individu.

semaine, mois, année) permettent de mesurer les flux. Le flux s'apparente à un taux ou une vitesse. Les stocks et les flux ont de nombreux terrains de jeu, on les retrouve dans la sphère économique, la comptabilité, mais également l'énergie, les ressources naturelles, la gestion de l'eau, les gaz à effet de serre, les déchets, l'alimentation, la mobilité... Concrètement, l'analyse stocks - flux soulève la question du (ou des) flux entrant(s), qui alimente(nt) un stock, auquel on peut soustraire un ou plusieurs flux sortants. L'observation et la logique impliquent de différencier les flux entrants, les stocks et les flux sortants. Dans sa terminologie originelle, Forrester distinguait les *levels* (stocks) et les taux (flux). Un stock (ou « level variable ») est une entité qui s'est accumulée au fil du temps par des entrées et/ou réduite par des sorties. Les stocks ne peuvent être modifiés que par des flux. Mathématiquement, un stock peut être considéré comme une accumulation ou une intégration de flux dans le temps, les flux sortants étant soustraits du stock. Les stocks ont généralement une certaine valeur à chaque instant - par exemple, le nombre d'habitants à un moment donné ou la quantité d'eau dans un réservoir. Un flux (ou « rate ») modifie un stock au fil du temps. En général, nous pouvons clairement distinguer les flux entrants (qui s'ajoutent au stock) et les flux sortants (qui se soustraient du stock). La modélisation en dynamique des systèmes nécessite de repérer rapidement les stocks, les flux entrants et les flux sortants.

*Tableau 3 : Distinction Flux entrants, Stocks et flux sortants*

<b>Flux entrants</b>	<b>Stocks</b>	<b>Flux sortants</b>
Investissements	Capital physique	Dépréciation du capital
Dépôts	Actifs monétaire	Retraits
Construction	Logements	Dépréciation des logements
Précipitations	Stock d'eau	Consommation de l'eau
Emissions de GES	CO2 dans l'atmosphère	CO2 absorbé
Arbres plantés	Arbres	Arbres abattus
Naissances	Population	Décès
Production	Stock de produits finis	Consommation
Investissements	Stocks de matière premières	Extraction de matières premières

En économie, la distinction entre flux - stocks s'estompe trop souvent derrière l'immense majorité des flux. Le produit intérieur brut (PIB), la production, la consommation, les importations, les exportations, les revenus, le salaire, les dépenses, l'épargne ... sont principalement des flux. Or cette comptabilisation omet de rappeler d'une part, que derrière la production de biens, il y a des stocks de ressources naturelles (dès lors, une augmentation de la production nécessite une extraction de ressources naturelles et donc une diminution du stock de ressources disponibles) et d'autre part, que les transactions économiques ont besoin d'actifs monétaires pour réaliser des échanges. De ce fait, nos comptes bancaires libellés en monnaie (stocks) sont alimentés par des flux entrants, les dépôts, les virements (principalement nos salaires et revenus) et les crédits ; et des flux sortants, les dépenses de consommation, les placements financiers, le remboursement des intérêts....

*Sous sa forme mathématique*, si la quantité d'un stock  $S$  varie sur le temps  $t$ , soit  $S(t)$ , la dérivée  $dS(t)/dt$  est le taux de changement de ce stock sur le temps. L'interaction entre les stocks, les flux entrants et les flux sortants prend la forme d'une intégrale de  $t_0$  à  $t$  :

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Inflow(s) - Outflow(s)] ds + Stock(t_0)$$

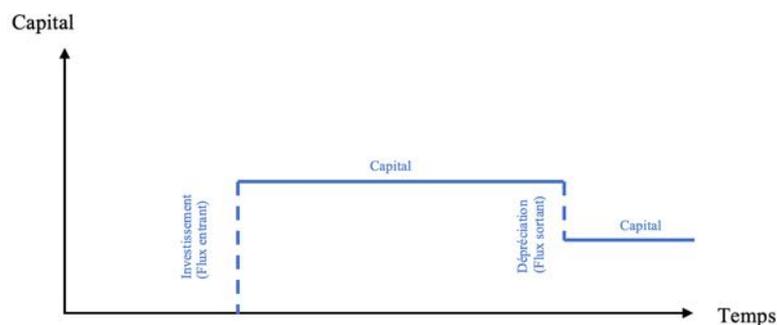
En économie, le stock de capital  $K$  sur le temps  $t$ , soit  $K(t)$ , peut être augmenté suite à une variation du flux d'investissement  $I(t)$  et diminué suite à un flux de dépréciation  $D(t)$  du capital<sup>16</sup>. Le taux de changement du stock de capital peut être ainsi donné par l'expression :

$$\frac{dK_t}{dt} = I(t) - D(t) = I_n(t)$$

Dès lors,  $I_n(t)$  représente le flux d'investissement net (investissement brut - dépréciation). Notons que l'on pourrait ici établir une correspondance entre les flux de dépréciation et les flux d'amortissement (permettant de réguler la perte valeur du stock de capital).

*Sous sa forme graphique*, le stock (et les flux) s'apparente à une courbe ou une droite d'évolution d'un comportement (l'axe vertical identifie la variable étudiée, par exemple, le Capital, et l'axe horizontal le temps, ce dernier permet de comprendre ce qui s'est passé, ce qui se passe et ce qui pourrait se passer, dans le cas d'une simulation). Nous verrons dans l'étape 6 *Structure et comportements* que la forme de la courbe a son importance.

Figure 6 : La dynamique du stock de capital



La courbe du stock de capital évolue lentement dans le temps, même si les flux entrants (investissements) et sortants (dépréciation) peuvent changer rapidement (le stock permet de découpler les flux entrants des flux sortants. Donella Meadows (2008) parle d'inertie du capital pour rappeler que les stocks s'ajustent progressivement et qu'ils ont besoin de temps (en microéconomie, l'hypothèse est généralement faite que le travail s'ajuste plus rapidement à court terme que le capital, l'évolution de ce dernier s'inscrit davantage dans le moyen ou long terme). On retrouve également ici

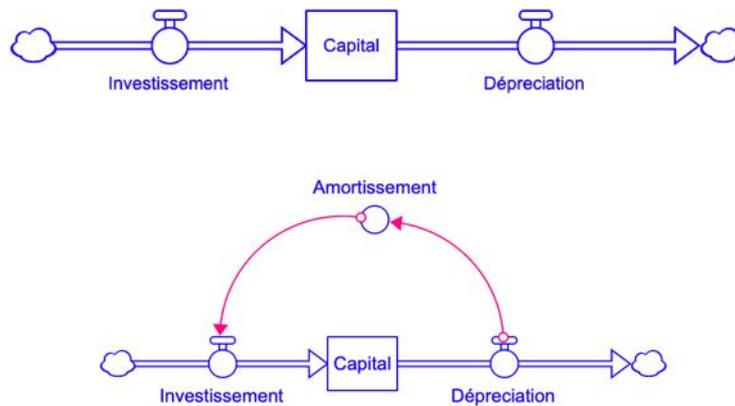
<sup>16</sup> On a là une expression du principe d'accumulation de Samuelson.

l'illustration du phénomène de stock tampon. Le stock de capital peut amortir les chocs dans un système (plus de machines permet de répondre aux pannes et aux défaillances, plus de machines permet de maintenir une productivité moyenne constante sur le temps).

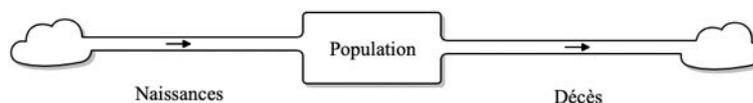
*En dynamique des systèmes*, la formalisation associe la figure d'un rectangle aux stocks, des flux entrants et sortants sont caractérisés par des robinets et des flèches directionnelles (entrantes et sortantes) de ces mêmes stocks. Dans ce qui suit, nous présentons les expressions du principe d'accumulation (capital, population, CO2) à partir de trois logiciels (Vensim, Stella, Insight Maker<sup>17</sup>), couramment utilisés en dynamique des systèmes.

Figure 7 : Représentation du principe d'accumulation avec Stella, Vensim et Insight Maker

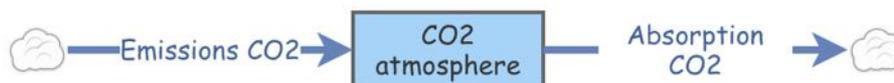
Sous Stella, le capital



Sous Vensim, la population



Sous Insight Maker, le CO2



<sup>17</sup> <https://vensim.com>,  
<https://insightmaker.com>

<https://www.iseesystems.com/store/products/stella-online.aspx>,

Les nuages présents à droite et à gauche du schéma soulignent le fait que nous ne cherchons pas à détailler les origines d'un flux entrant (partie gauche) ou les conséquences d'un flux sortant (partie droite). Ils constituent également une expression des limites d'un système, celles que nous devons préciser dès l'analyse d'un problème. Si nous prenons le tableau initial de la représentation de notre système (figure 4), alors une nouvelle colonne va apparaître à droite.

Tableau 4 : Statut des variables d'un système

Variables	Statut de la variable (Driver, variable endogène, variable exogène, variable rejetée, paramètre)	Etat de la variable (Flux entrant, stocks ou flux sortant)
Consommation des ménages	Driver	Flux sortant
Production de biens	Driver	Flux entrant
Stocks de produits finis	Variable endogène	Stock

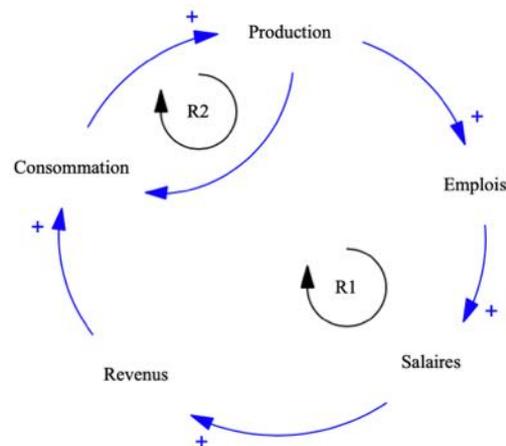
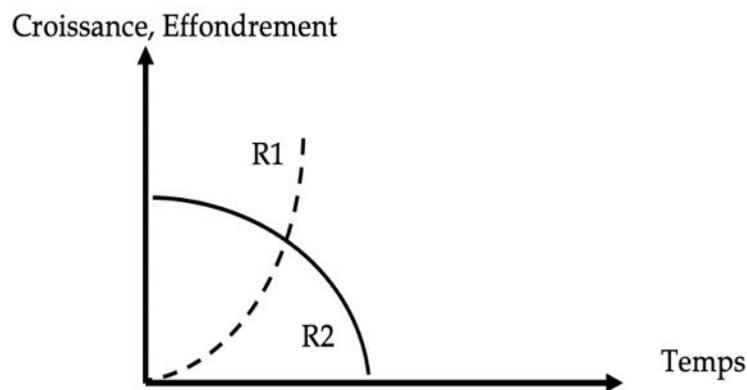
### La boucle de rétroaction (étape 3)

La dynamique des systèmes envisage la représentation du monde sous la forme de boucles de rétroaction (Richardson, 1991). C'est un processus qui montre l'ensemble d'une chaîne causale, avec son point de départ et son point d'arrivée. Le comportement d'un système (composé de flux et de stocks) que l'on observe sur le temps, peut être appréhendé par une boucle de rétroaction. Selon Forrester (1992), les boucles de rétroaction forment la structure centrale d'un système et contrôlent les changements de tous les systèmes : « *Feedback loops are the organizing structure around which system dynamics models are constructed... Symptom, action and solution are not isolated in a linear cause to effect relationship, but exist in a nest of circular and interlocking structures. In such structures an action can induce not only correction but also fluctuations, counterpressures, and even accentuation of the very forces that produced the original symptoms of distress. All change takes place within the control of feedback loops* » (1992, p. 44).

La pensée en boucle (fermée, ouverte) suppose que la causalité ne va pas dans un seul sens et que chaque cause n'est pas indépendante de toutes les autres. L'effet se répercute généralement pour influencer une ou plusieurs des causes et les causes elles-mêmes s'influencent les unes les autres. Le diagramme des boucles causales (*Causal Loop Diagram* - CLD) est l'aboutissement du système à construire (étape 7). C'est une simple carte d'un système avec toutes ses composantes et leurs interactions. Le CLD nous aide à visualiser la structure, les relations fonctionnelles et le comportement d'un système. Il s'agit avant tout d'un modèle qualitatif (que l'on peut également qualifier de modèle mental). Ce point est important car il rappelle qu'un modèle est avant tout qualitatif (il doit reposer sur des hypothèses qu'il convient de tester, c'est le modèle structurel). L'observation, la créativité, la curiosité et le niveau détails du modèle nous permettront de nous représenter un modèle qui se rapproche de la réalité (un modèle reste simplifié, mais ce n'est pas un postulat de base, le véritable postulat, c'est appréhender un système complexe sans pour autant être compliqué à comprendre).

Il existe deux types de boucles de rétroaction (Kim, 1990). Les boucles de rétroaction de renforcement (R pour reinforcing) sont positives. Elles s'auto-renforcent, ce qui signifie qu'elles aggravent le changement dans une direction avec encore plus d'intensité (Wardman, 1994). Si elles ne sont pas stoppées (par une boucle de régulation), elles continuent de renforcer un comportement particulier. Un tel mouvement peut conduire à une croissance exponentielle (c'est la fameuse croissance économique sans limites). Cependant, les boucles de renforcement ne sont pas toujours synonymes de croissance (R1). La même structure de renforcement qui crée la croissance peut également produire un effondrement (R2).

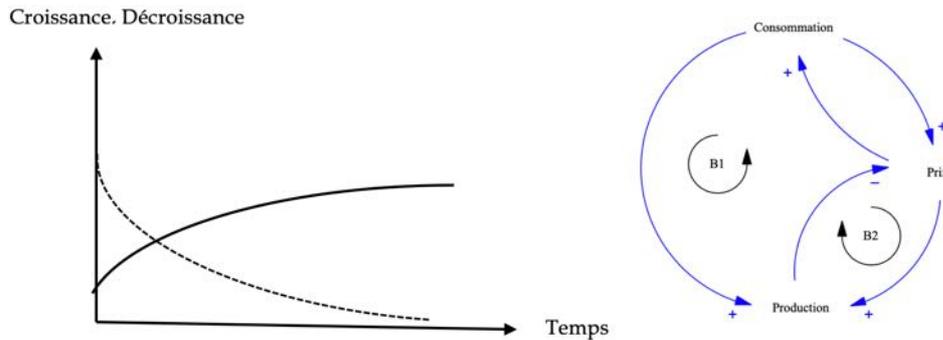
Figure 8 : Une boucle de renforcement



Dans le cas d'étude proposé, il est possible de créer (avec Vensim) des boucles de renforcement, s'appuyant sur les chaînes de causalité suivantes : R1 décrit la dynamique de la consommation (une hausse de la consommation augmente la production, qui permet de créer des emplois, de distribuer des salaires, des revenus), R2 décrit la dynamique de la production qui, via de la publicité, de l'innovation, des promotions, va stimuler la consommation. La production et la consommation sont des drivers de la croissance économique.

Les boucles de rétroaction d'équilibrage (B pour Balancing) sont négatives et constituent une structure d'équilibre ou de recherche d'objectifs dans les systèmes. Cette boucle est source de stabilité mais également de résistance au changement. Une boucle d'équilibrage aura tendance à amener de façon asymptotique la structure d'une boucle vers un état d'équilibre (on parle de *comportement homéostatique*).

Figure 9 : La boucle d'équilibrage

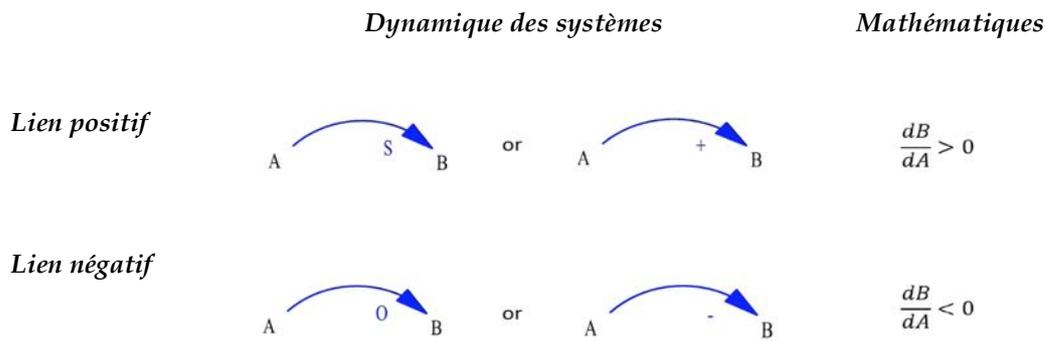


Ici, deux boucles de régulation peuvent être identifiées. B1 part du principe que la hausse de la consommation va stimuler la production, qui engendre une baisse des prix et donc une hausse de la consommation. C'est le produit des signes (+) (-) (+) qui traduit la boucle négative (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre). B2 suggère que la hausse de la consommation provoque une hausse des prix, qui stimule la production, génère une baisse des prix et provoque une hausse de la consommation. Le produit des signes (+) (+) (-) (+) donne une boucle négative. La conception d'une boucle conduit à plusieurs interprétations (Diemer, 2019, Lannon, 2012) :

1° Les boucles de rétroaction sont au cœur de la dynamique des systèmes, elles expliquent comment un système peut s'autoréguler ou au contraire devenir instable. La loi de l'offre et la demande, le mécanisme du Cobweb, le multiplicateur keynésien, le principe de l'accélérateur, les cycles... sont donc de parfaites illustrations de la dynamique des systèmes. Les boucles de rétroaction relient des éléments d'un système de façon cyclique (les effets d'une action reviennent à influencer sa cause initiale). La boucle de rétroaction positive (boucle d'amplification) tend à déséquilibrer ou accélérer le changement, la boucle de rétroaction négative (boucle de stabilisation) tend à stabiliser le système. La boucle de rétroaction négative agit comme une boucle de rappel, quand une variable s'écarte d'un certain niveau, le système agit pour la ramener vers cet équilibre (hausse de la population, hausse de la mortalité, baisse de la population).

2° Une boucle s'appuie principalement sur un ordre des causalités et une formulation mathématique. Si A est la cause de B, (i) une augmentation de A peut se traduire par une augmentation de B, mathématiquement,  $dB/dA$  est positif (on dit également que A et B évoluent dans le même sens, S pour same side), ou une baisse de B, mathématiquement,  $dB/dA$  est négatif (on dit que A et B évoluent dans le sens opposé, O pour Opposite side).

Figure 10 : Liens de causalité

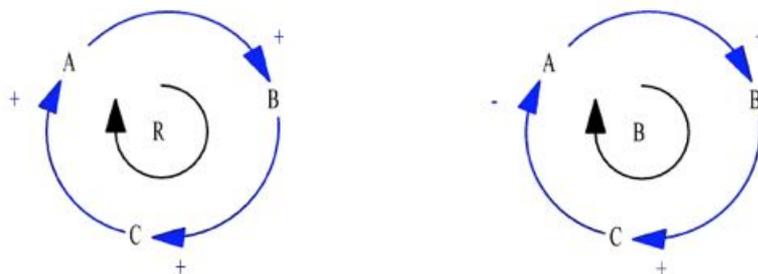


3° Une boucle s'exprime sous la forme d'une chaîne de causalités, c'est donc le produit de ces causalités qui indique l'existence d'une boucle de Renforcement (R) ou d'une boucle de Régulation (B). Dans le cas de la boucle de renforcement (R), le signe + est le résultat du produit de la causalité de A vers B (+), B vers C (+) et C vers A (+). Dans le cas d'une boucle de régulation (B), le signe - est le résultat du produit de la causalité de A vers B (+), B vers C (+) et C vers A (-).

Figure 11 : Les boucles de renforcement et d'équilibre

*Boucle de renforcement positive*

*Boucle d'équilibre négative*



*Source* : Sterman (2000), Diemer (2004)

4° Une boucle de rétroaction introduit plusieurs considérations : (i) la prise en compte d'un possible décalage temporel dans la causalité, (ii) l'apparition d'un système non linéaire, (iii) une réflexion autour du niveau de détails d'une boucle (étant entendu que le signe de la boucle dépend du produit des signes de chaque causalité).

5° Pour déterminer si une boucle est renforçante ou équilibrante, une méthode rapide consiste à compter le nombre de « - ». S'il y a un nombre pair de - (ou zéro), la boucle est renforçante ; sur un nombre impair, elle est équilibrante<sup>18</sup>.

A la suite de la construction de cette première boucle, notre tableau s'enrichit d'une nouvelle colonne.

<sup>18</sup> Attention, l'application de cette méthode mérite d'être tempérée par le commentaire suivante, il faut toujours lire (et relire) la boucle pour vérifier que les liens sont correctement identifiés.

Tableau 5 : Description des boucles

Variables	Statut de la variable (Driver, variable endogène, variable exogène, variable rejetée, paramètre)	Etat de la variable (Flux entrant, stocks ou flux sortant)	Boucle de renforcement (R+) ou d'équilibre (B-)	Description de la boucle
Consommation des ménages	Driver	Flux sortant	R1	

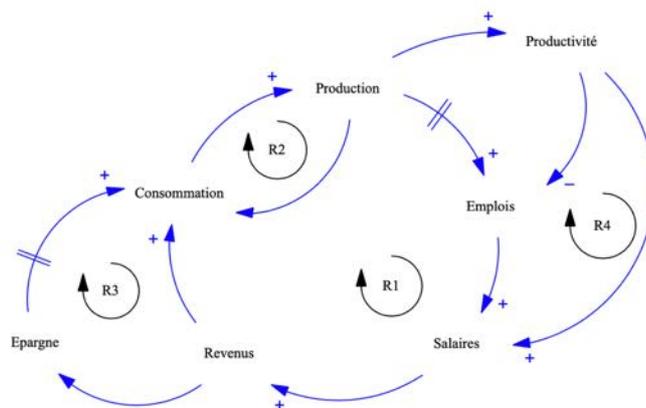
## Les effets de retard et les délais (étape 4)

Avec les boucles de causalité et peut être les relations flux-stocks, les effets de retard et les décalages temporels constituent les éléments les plus problématiques en matière de dynamique des systèmes... Certains raisonnements (voire des pseudo-certitudes) peuvent nous amener à formuler des croyances erronées (Sterman, 2003).

Les délais entre la prise d'une décision et ses effets sur l'état du système sont fréquents et peuvent se révéler particulièrement gênants lorsqu'il s'agit de comprendre la dynamique d'un système. Les retards dans les boucles de rétroaction créent de l'instabilité et augmentent la tendance des systèmes à osciller (Sterman, 1989a, 1989b). La découverte d'un nouveau gisement de ressources naturelles, la construction d'une nouvelle usine de production, la mise en place d'une nouvelle supply chain, la constitution d'une épargne ... impliquent des délais entre le déclenchement de l'action (s'engager dans un projet, réunir les fonds financiers et mobiliser son épargne, bâtir les infrastructures, acheter les machines, ...) et ses effets sur le système. La plupart du temps, les décideurs apportent des mesures correctives de manière à faire converger le système vers l'état souhaité (il y a toujours un écart avec l'état réel du système).

Il est possible ici de caractériser plusieurs formes de délais. (1) *Le plus simple est un délai qui renforce le système en place. C'est l'illustration de l'épargne qui se traduit dans le futur, par une augmentation de la consommation (figure 9).*

Figure 12 : Délai de retard de la consommation induit par l'usage de l'épargne



L'épargne engendre une boucle R3 de renforcement avec un décalage temporel (l'épargne que nous accumulons, peut servir à un achat programmé dans le futur). De

la même manière, la hausse de la production peut ne pas se traduire tout de suite par une création d'emplois (R1) mais générer une hausse de productivité (permettant d'obtenir un salaire plus élevé). Dans ce dernier cas, la hausse de la production introduit une nouvelle boucle R4, différente de R1 (les deux petites barres sur la flèche indiquent le décalage temporel).

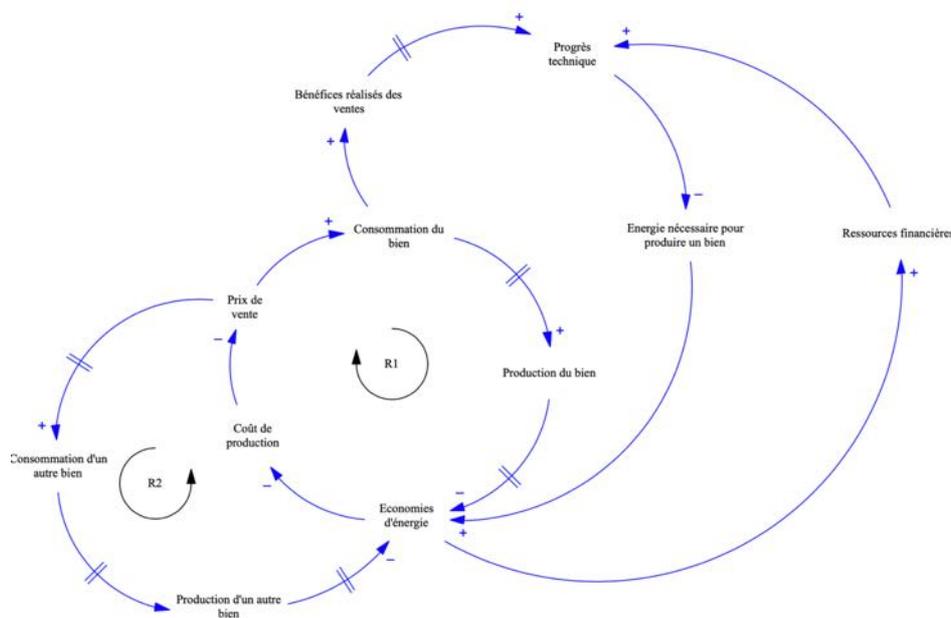
On peut citer également l'effet rebond. Lorsqu'un progrès technologique rend un équipement industriel plus efficient en énergie, ce dernier consomme moins d'énergie pour produire un bien, ce qui permet de faire des économies d'énergie, de réduire le coût de production et de baisser le prix de vente du produit. Toutefois, il est généralement admis que la baisse du prix de vente peut engendrer une hausse de la demande du produit (ou d'autres produits) et provoquer une hausse de la production. Les économies d'énergie prévues sont alors perdues (ou réduites). Les boucles R1 (effet direct) et R2 (effet indirect) renforcent ainsi une hausse de la consommation d'énergie suite à l'effet rebond. L'effet rebond a été largement mobilisé en politique énergétique, notamment via l'objectif de neutralité carbone pour 2050.

Précisons ici que les délais et effets de retard peuvent prendre place dans deux cas de figure diamétralement opposés.

(1) Le progrès technique provoque des baisses de consommation d'énergie mais l'objectif est bien de vendre plus de produits (logique de croissance du marché). L'effet rebond est alors un driver du système industriel et un moteur du système capitaliste.

(2) Le progrès technique ambitionne une baisse de la consommation d'énergie et en fait un objectif, dès lors toutes les économies d'énergie sont réinvesties (fond vert) dans le progrès technique pour faire tendre la consommation d'énergie vers 0.

Figure 13 : L'effet rebond



De manière plus générale, les délais réduisent notre capacité à accumuler de l'expérience, à tester des hypothèses et à apprendre (la conception de boucles causales repose sur l'expérience du modélisateur et la récurrence des exercices de modélisation). Ils ajoutent également des éléments de retard dans les boucles de rétroaction. Ainsi, le tri sélectif des déchets ne peut être optimal qu'une fois le processus de sensibilisation d'une population mis en place (cela passe par des campagnes de médiatisation mais également un processus d'éducation à l'environnement).

Dans les boucles négatives, les retards réduisent la marge d'ajustement du système linéarisé. Un décalage de phase suffisant fait que certaines valeurs propres du système deviennent des conjugués complexes, ce qui entraîne l'apparition de modes oscillatoires. Un décalage de phase plus important peut facilement amener les valeurs d'un système à devenir localement instable. Par exemple, les délais d'ajustement dans le 'Beer Game' peuvent créer des cycles et des fluctuations chaotiques (Sterman 1989a, 1989b, 1989c).

## Le principe de non linéarité (étape 5)

La dynamique des systèmes repose sur le postulat suivant : les relations non linéaires sont la norme plutôt que l'exception dans le fonctionnement des systèmes complexes. La non-linéarité signifie que les causes et les effets n'ont pas de relations simples et proportionnelles. John Sterman (1992, p. 9) a résumé ce principe en s'appuyant sur l'exemple suivant : « Prenons par exemple la relation entre la durée du travail et la productivité du travail. L'augmentation de la semaine de travail des ingénieurs de 40 à 44 heures par semaine peut accroître la production de dessins de 10 %. Mais les heures supplémentaires peuvent rapidement conduire à des rendements décroissants, voire négatifs, dans la mesure où l'allongement de la durée du travail entraîne de la fatigue, des erreurs supplémentaires et d'autres effets qui n'étaient pas importants auparavant »<sup>19</sup>. Les modèles de dynamique des systèmes décrivent avec une grande fidélité la riche gamme de relations non linéaires que l'on trouve dans la vie réelle. La dynamique des systèmes, plus que toute autre technique de modélisation formelle, souligne l'importance des non-linéarités dans la formulation des modèles.

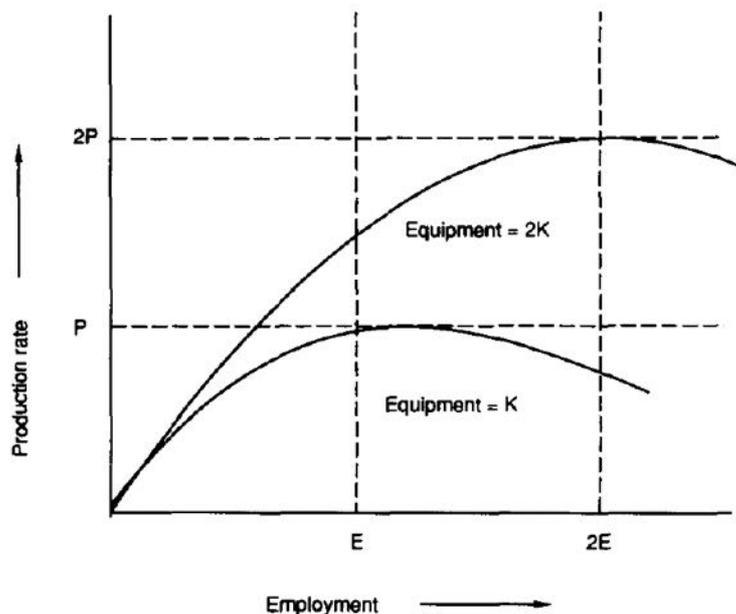
Selon Forrester (1992, p. 54), les non linéarités sont essentielles pour se donner une image fidèle des comportements socio-économiques. Il existerait selon lui, deux types de linéarités : (i) la première forme de non linéarité intervient lorsque l'influence d'un input dans un système n'est pas simplement proportionnelle à cet input. Forrester prend l'exemple des stocks, des ventes et des taux de livraison des marchandises. Il note que le stock de marchandises disponibles à la vente influe sur le taux de livraison des marchandises. Lorsque les stocks sont faibles, l'indisponibilité des marchandises réduit la capacité de livraison, mais, dans la limite des stocks 'normaux', le taux de livraison sera très peu affecté par les variations de stocks. (ii) la seconde source de non

<sup>19</sup> <https://web.mit.edu/jsterman/www/SDG/project.pdf>

linéarité apparaît lorsque les décisions ne sont pas indépendamment sensibles à deux ou plusieurs variables causales mais à un produit ou à une autre interrelation entre des variables. Ainsi, la livraison de marchandises ne dépend pas indépendamment et séparément des stocks de marchandises et des commandes de marchandises non honorées. S'il n'y a pas de commandes, les stocks ne jouent aucun rôle dans la détermination de la livraison ; s'il n'y a pas de stocks à partir desquels on peut assurer une livraison, les commandes ne peuvent pas produire de livraison.

De manière générale, on retrouve ces deux types de non-linéarité combinées. On peut utiliser ici un exemple emprunté à la microéconomie et développée par Forrester (1992). Considérons la capacité de production d'une usine, qui dépend du niveau d'emploi actuel (facteur travail) et des biens d'équipement disponibles (facteur capital). La figure 10 montre de quelle manière la production augmente au fur et à mesure que l'on recrute de nouveaux employés. On retrouve la fonction concave que décrivent les manuels de microéconomie (et bien entendu une expression de la productivité marginale du travail).

*Figure 14 : La production est une fonction du travail et du capital*



*Source : Forrester (1992, p. 54)*

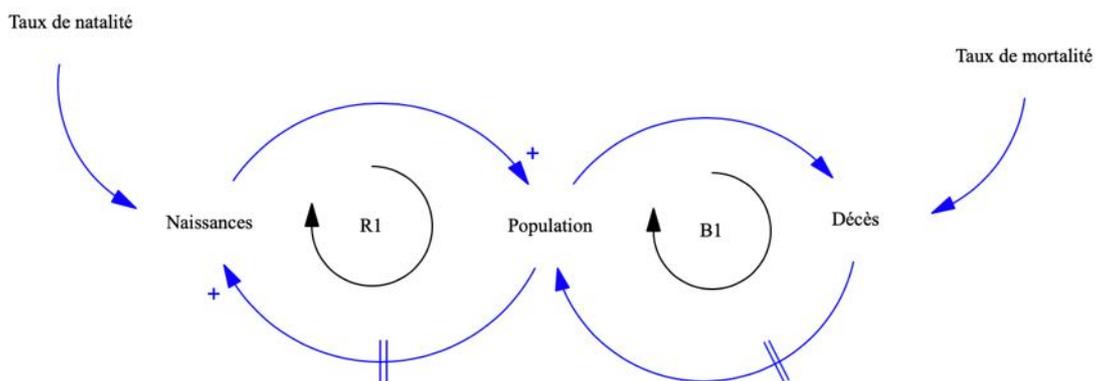
Au début, lorsque les employés viennent s'ajouter, chacun peut avoir accès à tout l'équipement nécessaire (capital), la productivité du travail est élevée et la production totale augmente fortement et proportionnellement au travail. Lorsque la capacité maximale de l'équipement est atteinte, la production supplémentaire par travailleur diminue. Au fur et à mesure que l'on s'approche de la capacité maximale des équipements, la production supplémentaire par travailleur diminue. Au-delà de ce niveau d'emploi, des personnes supplémentaires ne feraient qu'entraîner une perte de production. Ainsi, pour une quantité fixe d'équipements, la production n'est pas proportionnelle à l'emploi et présente une relation non linéaire. En outre, la

contribution à la production de tout changement donné de l'emploi dépend de la quantité d'équipement, de sorte que les deux intrants interagissent l'un avec l'autre. Lorsque le taux d'emploi est faible, il importe peu que la quantité d'équipement soit comprise entre  $K$  et  $2K$ . À des niveaux d'emploi plus élevés, la contribution des travailleurs supplémentaires est de plus en plus influencée par l'ajout ou non d'équipement. Selon Forrester, ce que nous avons tendance à qualifier de linéaire (la production est une fonction du travail et du capital) ne serait qu'une approximation de relations non linéaires, ce qui est tout à fait insuffisant au regard du processus de modélisation.

En résumé, la dynamique des systèmes et les systèmes non linéaires sont intimement liés car beaucoup de systèmes dynamiques sont naturellement non linéaires. La dynamique des systèmes est une méthode de modélisation qui cherche à comprendre comment des comportements (évolution dans le temps) émergent de structures internes (stocks, flux entrant, flux sortant, boucles de rétroaction, délais...). Ces structures produisent des comportements dynamiques non intuitifs (oscillations, effets de seuil, effondrements, effets retardés). Les systèmes non linéaires sont des systèmes dont la sortie n'est pas proportionnelle à l'entrée, il peut y avoir des seuils, des saturations, des accélérations et des explosions, des interactions multiples et multiplicatives. La dynamique des systèmes produit des comportements non linéaires de plusieurs sortes :

(1°) des boucles de rétroaction s'influencent mutuellement (une boucle positive peut activer une boucle négative) : une hausse des naissances augmente la population qui augmente les décès qui diminue la population.

*Figure 15 : Boucle R et Boucle B de la population*

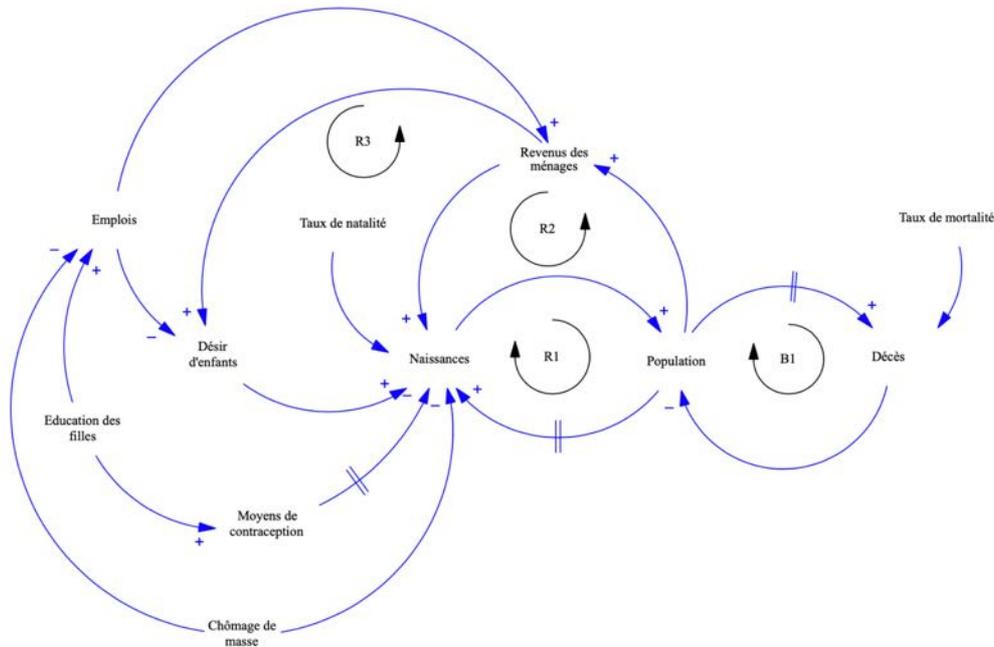


(2°) Les flux dépendent de plusieurs variables, par exemple les naissances peuvent dépendre à la fois de la population, du taux de natalité, des mesures de contraception, du désir d'enfants, des revenus du ménage, de l'éducation des femmes...



(4°) L'existence de seuils ou d'effets de seuil constitue un puissant déclencheur dans un système, ceci nous renvoie à la question des points de basculement. Le climat, l'environnement, l'économie génèrent de nombreuses incertitudes sur l'avenir. Si le chômage de masse est persistant dans un pays, certains ménages ne chercheront pas à avoir d'enfants tant leur situation en matière d'emplois est précaire.

Figure 18 : Les effets de seuil



La connexion entre dynamique des systèmes et systèmes non linéaires prend racine dans la réalité.

Tableau 6 : Dynamique des systèmes et systèmes non linéaires

Dynamique des systèmes	Systèmes non linéaires
Modélisation des comportements dans le temps	Etude des équations non linéaires
Utilisation des stocks et des flux	Usage des fonctions complexes
Produit des équations non linéaires	Les interactions entre variables sont multiples et rétroactives
Engendre des comportements imprévisibles ou contre-intuitifs	Produit des oscillations, des bifurcations, du chaos

Une illustration de cette interaction entre dynamique des systèmes et systèmes non linéaires peut être tirée du réchauffement climatique. On peut essayer de comprendre – à l'aide d'un modèle simplifié – comment les émissions de CO<sub>2</sub> entraînent une augmentation non linéaire de la température avec des effets de seuil et des boucles de rétroaction. Le modèle a une forme structurale définie par ses stocks (stock de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en GtCO<sub>2</sub>, température moyenne de la Terre en °C) et des flux (émissions de annuelles de CO<sub>2</sub> en GtCO<sub>2</sub>/an et absorption des puits naturels issue des forêts et des océans).

Une boucle de rétroaction positive souligne les relations causales suivantes, la hausse des émissions de CO<sub>2</sub> engendre une hausse de la température, qui génère une fonte des glaces, une baisse de l'albédo, une hausse du rayonnement solaire et donc une augmentation de la température. Cet effet est non linéaire car l'effet de la température (boucle) augmente plus vite que la hausse initiale de la température. La boucle de rétroaction négative précise que la hausse des émissions de CO<sub>2</sub> provoque une croissance des plantes, qui augmente l'absorption de CO<sub>2</sub>. Mais seulement jusqu'à un certain seuil, au-delà, la capacité des écosystèmes diminue (sécheresse, stress hydrique des plantes...).

Dès lors, l'augmentation de la température n'est pas proportionnelle à la quantité de CO<sub>2</sub> émis, à cause des rétroactions. On peut utiliser l'équation de la variation de la température (GIEC, 1999) :

$$\Delta T(t) = TCRE \times (E_{cumul}(t))^\alpha$$

où  $\Delta T$  est l'augmentation de température moyenne globale (°C) ; *TCRE* (*Transient Climate Response to Cumulative Emissions*) est la réponse climatique transitoire aux émissions cumulées<sup>20</sup> (en °C / 1000 GtCO<sub>2</sub>) ; *Ecumul*, les émissions cumulées de CO<sub>2</sub> depuis l'ère préindustrielle (en GtCO<sub>2</sub>).

$\alpha > 1$  pour capturer les rétroactions amplificatrices (non-linéarité)

Si  $\alpha = 1$  : relation linéaire.

Si  $\alpha > 1$  : accélération du réchauffement

Selon Nature et OurWorldData, les émissions cumulées de CO<sub>2</sub> depuis 1850 avoisinaient les 2500 GtCO<sub>2</sub> au 31 décembre 2021. Si on prend un *TCRE* moyen de 0.55 et une relation linéaire, la variation de température serait proche de 1.375 °C

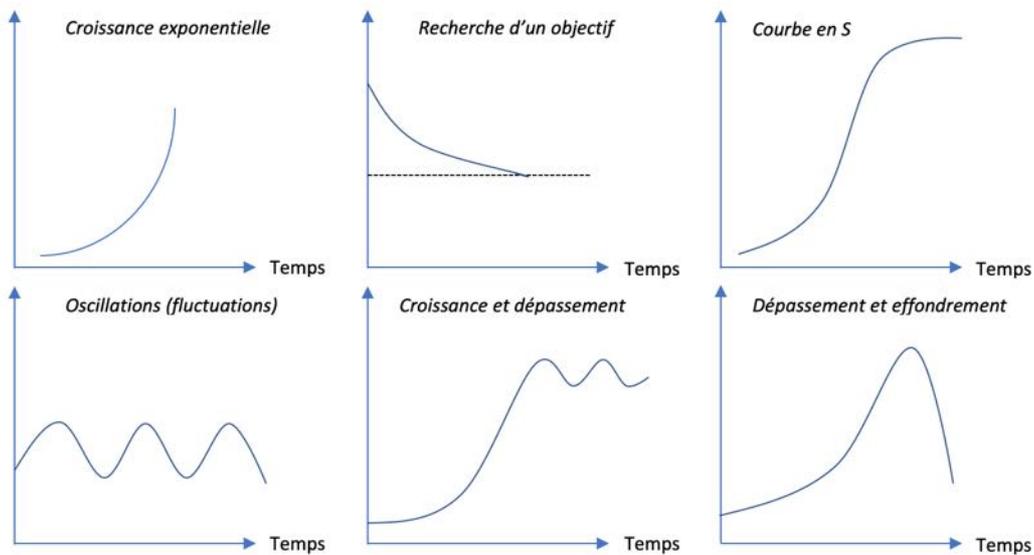
Le comportement du système climatique simplifié - via une combinaison entre la dynamique des systèmes et les systèmes linéaires - suit les trois phases suivantes : (1) montée lente de la température, (2) dépassement de seuil engendrant des boucles de rétroaction, et une accélération brutale de la température, (3) perte de contrôle via un point de basculement (disparition du permafrost avec libération du méthane et du CO<sub>2</sub>, perturbation des courants océaniques ou encore fonte des calottes polaires).

## La relation structure – comportements (Etape 6)

En dynamique des systèmes, la relation structure – comportement occupe une place centrale. Elle signifie que la structure interne d'un système détermine ses comportements dynamiques dans le temps. En d'autres termes, la mise en système d'un problème (jeu d'hypothèses) donne lieu à l'apparition d'un modèle de comportement ayant sa propre dynamique temporelle (Senge et al., 1994 ; Sterman, 2000). On parle également de courbes d'évolution des comportements (Meadows, 2008). On identifie généralement 6 grands types de relations structure comportement (figure 15) qui permettent de comprendre comment un système évolue (Forrester, 1992, p. 44).

<sup>20</sup> Le GIEC estime que le *TCRE* est compris entre 0.45 et 0.75 °C/1000 GtCO<sub>2</sub>

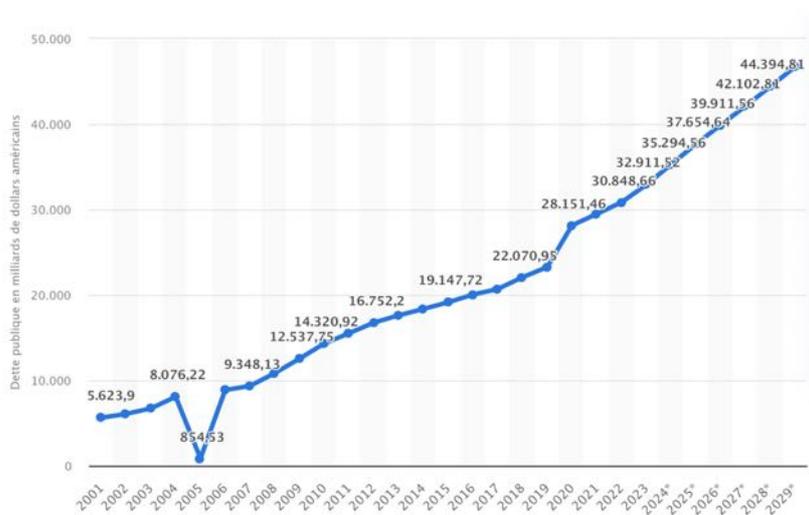
Figure 19 : Les grands types de relations structure - comportement



Source : tiré de Senge (1994) et Sterman (2000), Diemer (2004, 2020)

(1) La croissance exponentielle peut s'appliquer à la contamination générée par un virus, plus le nombre de personnes contaminés est important, plus la pente de la courbe sera importante. On peut également l'associer à une croissance économique qui n'aurait pas de limites (si la consommation, les exportations, l'investissement augmentent alors le PIB risque de croître de manière exponentielle). D'une manière générale, le stock s'accumule via l'entrée d'un ou plusieurs flux. La pente de la courbe indique la force de la relation causale entre le flux et le stock. Le système réagit lentement aux changements, il y a une sorte d'inertie qui rappelle que le changement est progressif même si le flux change brutalement. On peut prendre l'exemple de la dette publique américaine, même si les dépenses changent, le stock de dettes continue à évoluer lentement.

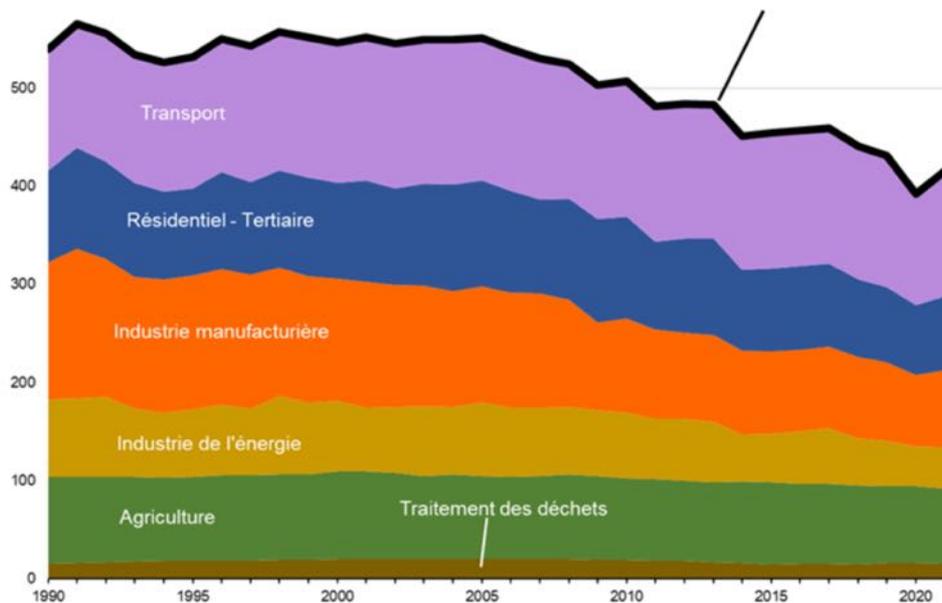
Figure 20 : Evolution de la dette publique américaine (2001 - 2029)



Source : Statista (2022)

(2) La courbe recherche d'objectif se traduit par la baisse (ou la hausse) d'une variable en cherchant à se rapprocher d'une asymptote définie par une valeur. C'est l'exemple de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour atteindre la neutralité carbone ou être conforme avec une trajectoire + 1.5°. La boucle de rétroaction négative (régulatrice) permet de stabiliser le système et de le ramener vers un équilibre. La stabilisation s'effectue autour d'une valeur cible (la neutralité carbone en 2050). La convergence vers l'objectif peut intégrer des oscillations s'il y a des délais dans la boucle. C'est ici la hausse des énergies renouvelables dans le mix énergétique qui se traduit par une baisse de la part des énergies fossiles et une réduction des émissions de GES à effet de serre.

Figure 21 : Evolution des émissions de GES en France (1990-2021) en MtCO<sub>2</sub>eq



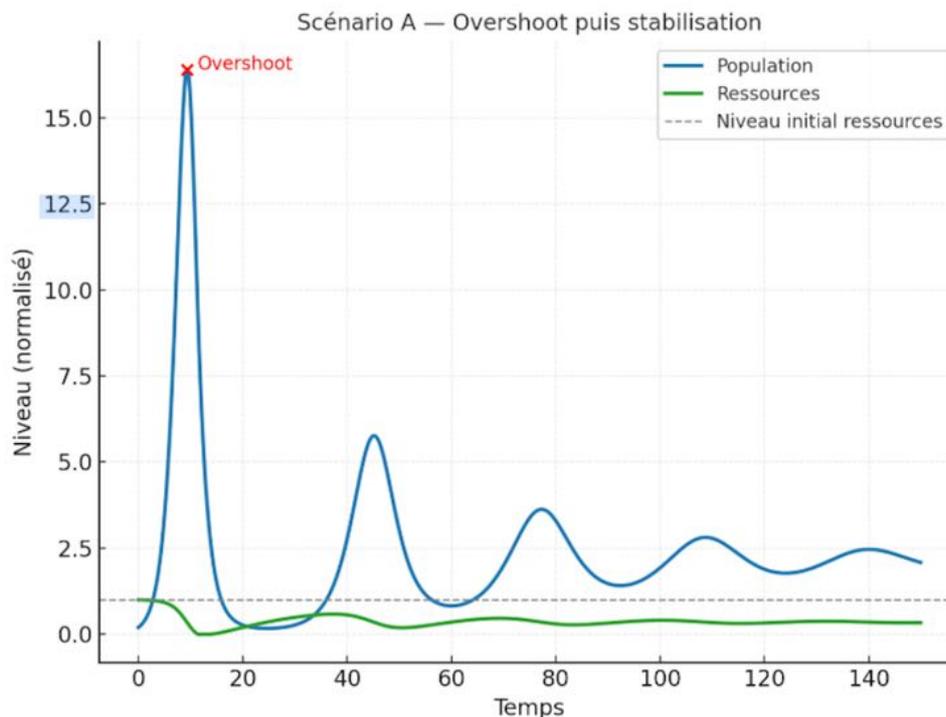
Source : Stratégie nationale bas carbone (2021)

(3) La courbe en S montre que le système possède plusieurs boucles de rétroaction en interaction, avec des dominances variables selon le contexte. Le comportement du système change dans le temps, il poursuit une croissance, puis entre en saturation et enfin décline. En marketing, la courbe S illustre une croissance exponentielle des ventes, puis un fléchissement pouvant aller jusqu'à l'arrivée à maturité du produit. En microéconomie, elle suggère une croissance forte de la production, puis un fléchissement induit par une baisse de la productivité du travail (à court terme), le point d'inflexion soulignerait une égalité théorique entre la productivité marginale du travail et le salaire réel (c'est l'un des résultats de la théorie néoclassique). En macroéconomie écologique, elle peut illustrer la croissance d'une population saturée par les ressources naturelles, la population croît car les ressources naturelles sont abondantes et accessibles, la population arrive sur un plateau étant donné que les ressources deviennent rares et peu accessibles, la population décline car les ressources naturelles ne sont plus suffisantes et sont sur le point de disparaître.



(5) *La courbe croissance et dépassement* introduit un seuil critique dans une relation ou une limite de capacité. Le système croît et change brusquement d'un delà d'un certain point. On peut prendre l'exemple d'une population qui dépasse temporairement la capacité des ressources, grâce à une sorte de régénération, le système parvient à trouver un point d'équilibre stable. Concrètement, la population croît, dépasse légèrement la capacité supportable tout en parvenant à se stabiliser. Les ressources diminuent mais leur régénération permet un nouvel équilibre avec la population. On peut qualifier cet exemple de croissance avec Overshoot (dépassement), sans effondrement.

Figure 24 : Le modèle de croissance avec dépassement

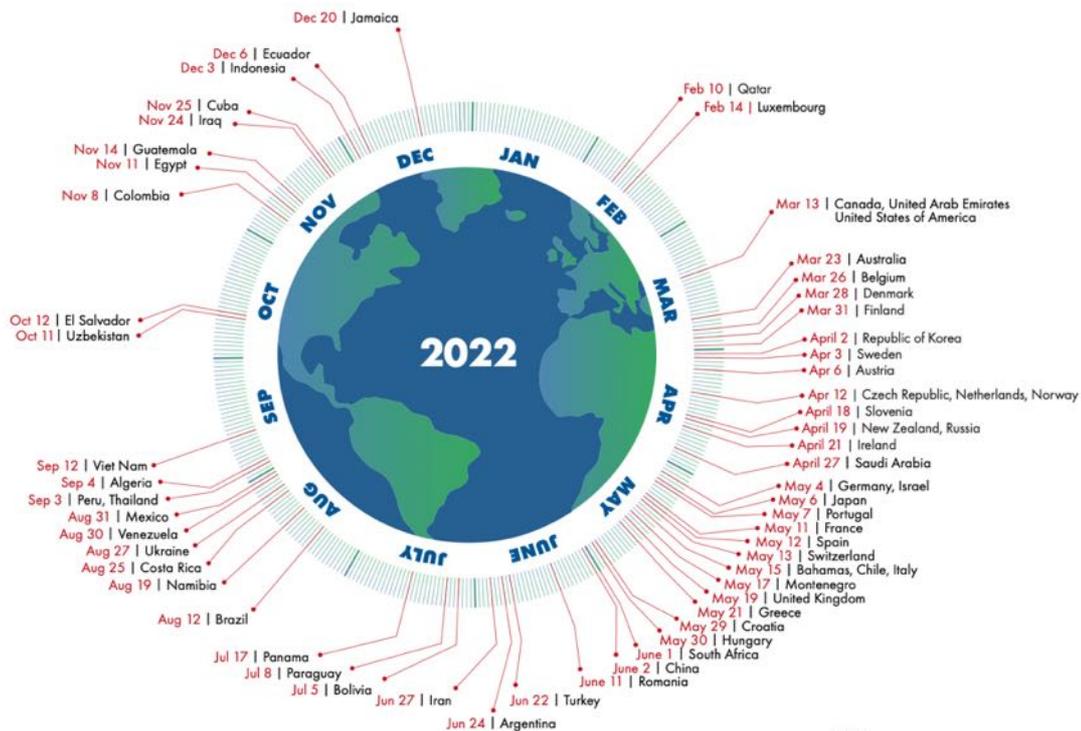


Source : L'auteur

Ce système s'appuie sur deux boucles principales : une boucle de renforcement (positive) qui relie la population aux naissances, et une boucle de régulation (négative) qui relie la hausse de la population à l'augmentation de la consommation de ressources et donc à la baisse de ces ressources. Si la boucle de régulation (régénération des ressources, réponses socioéconomiques, mortalité liée au manque) est suffisamment forte et rapide ; l'overshoot s'amortit et le système se stabilise.

Précisons que si l'Overshoot est une situation problématique (elle soulève la question de l'empreinte écologique par personne et de la biocapacité totale), elle peut perdurer dans le temps sans pour autant engendrer un effondrement (ce dernier interviendra lorsqu'un point de bascule provoquera une situation irréversible de non-retour).

Figure 25 : Country Overshoot Days 2022

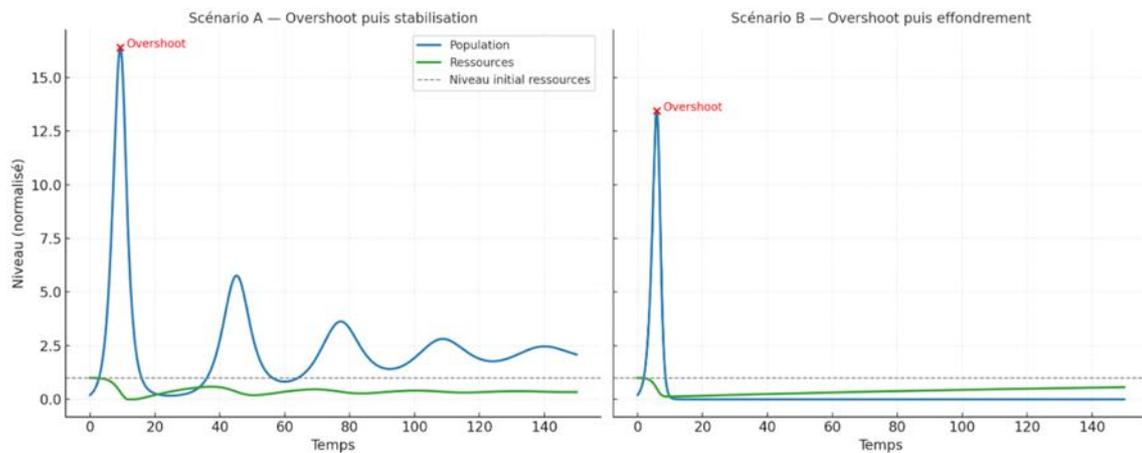


Source : National Footprint and Biocapacity Accounts, 2022 Edition

Le modèle de croissance et de dépassement peut également s’appliquer au marché du travail et au chômage structurel. La structure du modèle comporte des stocks de population active, d’emplois et de chômeurs, des boucles d’embauche, d’offre et de demande et de salaires. La limite est fixée par la capacité d’absorption du marché du travail. La courbe d’évolution suit la forme suivante : sous un certain taux de croissance économique, l’emploi croît, au-delà d’un seuil de chômage structurel, les chômeurs deviennent inemployables (perte de compétences). Le taux de chômage tourne autour d’un seuil critique (8%) pendant une longue période (stagnation ou trappe à chômage).

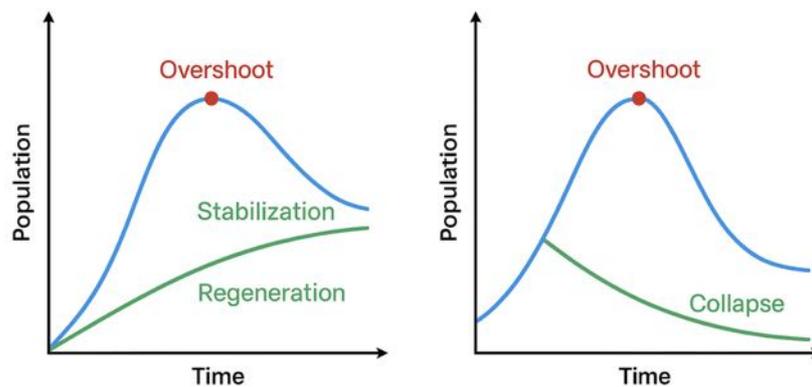
(6) La courbe de dépassement et d’effondrement (overshoot and collapse) est un comportement typique dans des systèmes où les ressources sont limitées, les délais sont longs et les boucles de rétroaction sont mal équilibrées. La structure du modèle s’appuie sur des stocks de ressources (non renouvelables ou lentement renouvelables), des flux de consommation de ces ressources (souvent accélérés par la croissance démographique ou économique), des boucles de rétroaction positive (la croissance stimule la consommation qui stimule davantage de croissance) et négative (l’épuisement des ressources réduit la capacité de soutien du système), des délais entre l’épuisement réel et la prise de conscience de la population (information et réaction). Le comportement comporte une phase de croissance rapide (overshoot) alimentée par l’abondance, ensuite une pénurie soudaine (collapse) lorsque les limites sont atteintes, et enfin une chute du système car il a dépassé sa capacité de charge. Une comparaison avec l’exemple précédent (croissance et dépassement) est ici instructive.

Figure 26 : Le modèle de comportement Croissance – Effondrement



La différence entre les deux simulations tient à la valeur des paramètres, à la non linéarité et aux échelles temporelles (délais). Lorsque la boucle de régulation est faible, lente ou si la mortalité augmente fortement quand les ressources diminuent, la population peut dépasser la capacité puis s’effondrer.

Figure 27 : Diagramme causal comparatif Croissance – Dépassement - Effondrement



Source : L’auteur

## Le diagramme des boucles causales (étape 7)

La pensée systémique est souvent décrite comme un langage permettant de parler des problèmes complexes et interdépendants auxquels nous sommes confrontés au quotidien (Richardson, 1986). Dans ce cadre, les diagrammes de boucles causales peuvent être considérés comme des phrases construites en identifiant les variables clés d'un système (Roberts, 1975, Morecroft, 1982) et en indiquant les relations causales entre elles via des liens (Lannon, 2012). En reliant plusieurs boucles, il est possible de créer une histoire concise sur un problème ou une question particulière.

Un diagramme de boucles causales se compose de quatre éléments de base : les variables, les liens entre elles, les signes sur les liens (qui montrent comment les variables sont interconnectées) et le signe de la boucle (qui montre le type de comportement que le système produira). En représentant un problème ou une

question d'un point de vue causal, on prend conscience des forces structurelles qui produisent un certain type de comportement.

Les diagrammes de boucles causales fournissent un langage permettant d'articuler la compréhension de la nature dynamique et interconnectée du système avec ses propriétés émergentes (le diagramme des boucles causales, c'est bien plus que la somme des boucles de causalité). Du point de vue de la dynamique des systèmes, les diagrammes de boucles causales (CLD) sont utilisés pour articuler des modèles dans le but de :

1° Comprendre les problèmes critiques et les points de levier potentiels ;

2° Élever la capacité et le potentiel du système à répondre à un problème ;

3° Evaluer le potentiel du système en fonction de l'objectif du système ;

4° Identifier les éléments qui atténuent et ceux qui amplifient les forces au sein d'un système. Si un CLD implique bien deux types de connexion (une relation causale positive et une relation causale négative), il convient de rappeler que son apport le plus important est l'interprétation mentale du chemin emprunté par les variables qui augmentent et les variables qui diminuent, en relation les unes avec les autres (Lawrence, 2022).

Un diagramme de boucles causales est une simple carte d'un système avec tous ses composants constitutifs et leurs interactions. En capturant les interactions et par conséquent les boucles de rétroaction, un diagramme de boucles causales révèle la structure d'un système (Sterman, 2000). En comprenant la structure d'un système, il devient possible de déterminer le comportement d'un système sur une certaine période de temps.

Au final, la construction d'un CLD permet de faire le point sur les caractéristiques d'un modèle en dynamique des systèmes, à savoir : (1) la sélection du thème (la création d'un CLD est avant tout un processus qui permet de mieux comprendre ce que l'on observe) ; (2) l'horizon temporel (il doit être assez long pour étudier la dynamique d'un système, comprendre son évolution et ses changements) ; (3) un diagramme permettant de comprendre l'évolution d'un comportement dans le temps (il s'agit de capturer les variables clés, et notamment la structure d'un système) ; (4) les limites du système (il est nécessaire de définir à quel moment on arrête d'ajouter de nouvelles variables, de nouveaux liens...) ; (5) le niveau d'agrégation (c'est la question du niveau de détail du modèle et de la complexité du modèle, les limites temporelles ou spatiales peuvent aider à fixer le modèle, les variables sélectionnées doivent renvoyer à des modèles de comportement et non à des événements spécifiques) ; (6) les délais temporels (il est impératif d'identifier les liens qui génèrent des décalages temporels par rapport au reste du CLD, on ne le dira jamais assez, les délais sont sources de déséquilibre entre les flux et les stocks). Daniel Kim (1992) a synthétisé ces caractéristiques sous la forme d'un guide de construction d'un CLD incluant une

première phase de sélection et d'identification des variables, une deuxième phase de de construction des boucles et une dernière phase de conseils généraux.

Figure 28 : Règles pour construire un CLD

	Guideline	Example
Selecting Variable Names	1. When choosing a variable name, use nouns. Avoid verbs and action phrases since the action is conveyed in the arrows. For example, "Costs" is better than "Increasing Costs," since a decrease in Increasing Costs is confusing. The sign of the arrow ("s" for same or "o" for opposite) indicates whether Costs increase or decrease relative to the other variable.	
	2. Variables should be something that can be measured—quantities that can vary over time. It does not make sense to say that "State of Mind" increases or decreases. A term like "Happiness," on the other hand, can vary.	
	3. Choosing the "positive" sense of a variable name is preferable. An increase or decrease in "Growth" is clearer than an increase or decrease in "Contraction."	
Loop Construction	4. For every course of action included in the diagram, think of the possible unintended consequences as well as the expected outcomes. An increase in "Production Pressure" may increase "Production Output," for example, but it may also increase "Stress" and decrease "Quality."	
	5. All balancing loops are goal-seeking processes. Try to make the goals driving the loop explicit. For example, Loop B1 may raise questions as to why increasing "Quality" would lead to a decrease in "Actions to Improve Quality." By explicitly identifying "Desired Quality" as the goal in Loop B2, we see that the "Gap in Quality" is really driving improvement actions.	
	6. Distinguishing between perceived and actual states, such as "Perceived Quality" vs. "Actual Quality," is important. Perceptions often lag reality, and mistaking the perceived status for current reality can be misleading and create undesirable results.	
	7. If there are multiple consequences of a variable, start by lumping them into one term while finishing the rest of the loop. For example, "Coping Strategies" can represent many different ways we respond to stress (exercise, meditation, alcohol use, etc.).	
	8. There are almost always differing long-term and short-term consequences of actions. Draw loops with increasing radius as they progress from short- to long-term processes. Loop B1 shows the short-term behavior of using alcohol to combat stress. Loop R1, however, draws out the long-term consequences which will actually increase stress.	
General Tips	9. If a link between two terms is not clear to others and requires a lot of explaining, the variables probably need to be redefined or an intermediate term needs to be inserted. "Higher Demand" leading to lower "Quality" may be less obvious than when "Production Pressure" is inserted in between.	
	10. A shortcut to determining whether a loop is balancing (B) or reinforcing (R) is to count the number of "o's" in the loop. An odd number of "o's" indicates a balancing loop, an even number (or none) means it is a reinforcing loop. CAUTION: After labeling the loop, you should always talk yourself around the loop and make sure the story agrees with your R or B label.	

Source : Kim (1992, p.6)

Quatre remarques complémentaires concernant la construction du CLD peuvent être formulées ici :

(1) La construction d'un diagramme de boucles causales repose sur l'observation (on peut y puiser des éléments théoriques), on décrit ce que l'on observe. Ensuite, on introduit les points leviers (*leverage points*) pour changer le système (étape 10). Il y a donc deux diagrammes de boucles causales distincts : celui que l'on observe, celui que

l'on voudrait ! Si rendre un système plus durable, résilient et circulaire est une nécessité, il faut actionner les bons leviers !

(2) Une fois que le diagramme de boucles causales est terminé, il est judicieux de parcourir les boucles et de « raconter l'histoire », pour être sûr que les boucles capturent le comportement décrit. Le modèle doit être cohérent en apportant une réponse, acceptée par le plus grand nombre. Cette réponse est une connaissance commune.

(3) En utilisant des diagrammes de boucles causales pour créer des histoires sur des problèmes complexes, nous pouvons rendre plus explicite notre compréhension des interrelations au sein de la structure d'un système. Les diagrammes obtenus fournissent une représentation visuelle qui peut être utilisée pour communiquer cette compréhension aux autres (Sternan, 2000). Avec de la pratique, il est possible d'acquérir des compétences permettant de raconter des histoires de systèmes qui nous aident à reconnaître les effets multiples et interdépendants de nos actions.

(4) Enfin, la construction d'un diagramme de boucles causales reçoit désormais une aide intéressante, celle de l'Intelligence Artificielle (IA). En effet, l'intelligence artificielle repose sur des chaînes de causalités intégrant le bon sens et la logique. Il est donc très simple de lancer une requête intégrant une chaîne de causalités ou de conséquences, de manière à nous aider à complexifier le modèle. C'est selon nous, un lien fort entre l'étape 15 (Scénarios et narratives) et l'étape 6 (diagramme de boucles causales), celui d'apporter un récit ou de narrer des chaînes causales permettant à l'IA d'apprendre à faire des boucles de causalité et par requêtes successives, de mettre en lien différentes boucles. A ce niveau, l'AI devient un outil de structuration d'un modèle.

## Penser global et complexité (étape 8)

Le passage de l'étape 7 (diagramme des boucles causales) à l'étape 7 (Penser global et complexité) s'inscrit dans la continuité de l'acte de modélisation. En effet, au fur et à mesure de la construction du diagramme de boucles causales à polarité positive ou négative, on commence à donner du contenu au modèle (avec un certain niveau de détails). Ces détails vont vous amener à repousser sans cesse les limites de notre système. Et les boucles peuvent nous emmener très loin. Dans un modèle sur l'eau, on peut aller chercher des boucles intégrant le stress hydrique des plantes, le recyclage de l'eau, l'extraction des métaux et des composants chimiques de l'eau, l'utilisation de l'eau chaude et de la vapeur d'eau pour chauffer des logements... On entre ici dans un débat que les modélisateurs aiment bien exposer, celui d'un modèle complexe et d'un modèle compliqué. Plus le diagramme des boucles causales se complexifie, plus certaines boucles vont jouer le rôle de dynamique dans le modèle (on parle ici de dominance de boucles). Chercher à identifier dans une boucle, un driver (la variable qui impulse la dynamique), c'est relativement simple, mais isoler les boucles qui impulsent la dynamique, est un peu plus complexe.

Figure 29 : Trop de complexité tue le CLD



Source : L'auteur

Ce que l'on a coutume d'appeler *Forest Thinking* (Richmond, 1991, 1994) regroupe les détails destinés à nous donner une image « moyenne » du système. Elle réduit la complexité du modèle aux similitudes et aux principales voies d'accès. Ainsi, la pensée systémique retient l'approche globale pour comprendre des problèmes complexes... Elle ne peut accepter de simplifier la réalité toutefois elle devra se fixer certaines limites dans le niveau de détail du modèle. Le concept de *Forest Thinking* sous-entend plusieurs choses :

1- *Comprendre les interconnexions* : Les forêts sont des écosystèmes où divers éléments, tels que les arbres, les plantes, les animaux et le sol, sont interdépendants. De même, dans la pensée systémique, nous reconnaissons l'interconnexion des différents composants d'un système. *Forest Thinking* nous encourage à considérer les problèmes et les situations dans un contexte plus large, en tenant compte des relations et des boucles de rétroaction qui influencent les résultats.

2- *Adopter un schéma de pensée sous la forme de boucles de rétroaction* : Les boucles de rétroaction jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des écosystèmes naturels et sont tout aussi importantes pour comprendre les systèmes. *Forest Thinking* nous apprend à identifier et à analyser différents types de boucles de rétroaction, telles que les boucles de renforcement et d'équilibrage, afin de comprendre comment les changements dans une partie d'un système peuvent avoir un impact sur l'ensemble du système.

3- *Préférer les similitudes plutôt que les différences du système*. La dynamique des systèmes réduit la complexité du modèle aux similitudes et aux principales voies d'accès. Elle retient l'approche globale pour comprendre des problèmes complexes. *Forest Thinking* ne peut accepter de simplifier la réalité (l'arbre qui cache la forêt) toutefois elle devra se fixer certaines limites dans le niveau de détail du modèle. Sinon, le système observé

sera impropre à toute analyse. Trop souvent, nous nous concentrons sur les détails (nous revivons une scène de la vie comme une séquence d'évènements détaillés). C'est la pensée arbre par arbre. Les modèles mentaux que nous créons en adoptant la pensée arborescente ont tendance à être vastes et excessivement détaillés, les limites intensives sont profondes. Les modèles inspirés de la *Thinking Forest* regroupent les détails pour nous donner une image moyenne du système. La dynamique des systèmes doit ainsi se concentrer sur les similitudes plutôt que sur les différences présentes dans un système.

4- *Reconnaître les propriétés émergentes d'un système* : Les forêts présentent des propriétés émergentes, c'est-à-dire que le tout est plus que la somme de ses parties. De même, la pensée systémique met l'accent sur l'émergence de modèles ou de comportements inattendus résultant des interactions entre les composants d'un système. *Forest Thinking* nous invite à accepter l'émergence de propriétés et de phénomènes nouveaux au sein des systèmes, ce qui encourage la créativité et l'adaptabilité dans la résolution des problèmes.

5- *Mettre l'accent sur la résilience du système* : Les forêts sont des écosystèmes résilients capables de s'adapter aux perturbations et de maintenir leur intégrité. *Forest Thinking* nous rappelle l'importance de la résilience dans la pensée systémique. En tenant compte de la résilience des systèmes et en explorant les moyens de l'améliorer, nous pouvons élaborer des stratégies pour relever des défis complexes et promouvoir la durabilité.

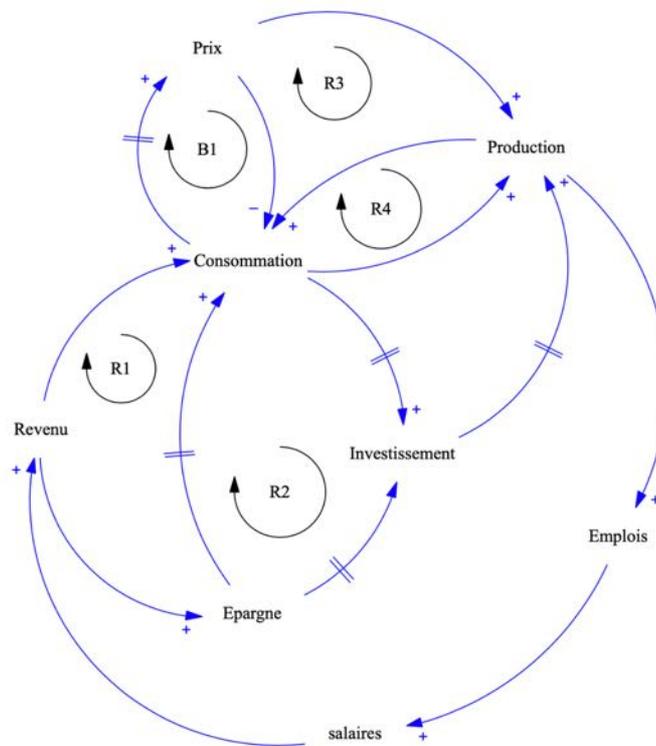
6- *Promouvoir la réflexion à long terme* : Les forêts poussent et évoluent sur de longues périodes, ce qui souligne l'importance de la pensée à long terme. *Forest Thinking* nous encourage à passer d'une pensée linéaire et à court terme à un état d'esprit plus holistique et tourné vers l'avenir. En considérant les conséquences à long terme de nos décisions et de nos actions, nous pouvons faire des choix plus éclairés qui profitent à la fois au système et à ses parties prenantes.

D'une certaine manière, la notion de *Forest Thinking* nous permet d'établir un parallèle entre l'approche systémique et la notion de complexité... Parallèle qu'Edgar Morin (2005, p. 29) a souligné à plusieurs reprises. Selon lui, l'approche systémique aurait de nombreuses vertus : (i) celle d'avoir mis au centre de la théorie, avec la notion de système, non une unité élémentaire discrète, mais une unité complexe, un tout qui ne se réduit pas à la somme de ses parties constitutives ; (ii) celle d'avoir conçu la notion de système, ni comme une notion réelle, ni comme une notion purement formelle, mais comme une notion ambiguë ou fantôme ; (iii) celle de se situer à un niveau transdisciplinaire qui permet à la fois de concevoir l'unité de la science et la différenciation des sciences, non seulement selon la nature matérielle de leur objet mais aussi, selon les types et les complexités des phénomènes d'association/organisation. Le mot est ainsi lâché, l'approche systémique porte en elle un principe essentiel, le principe de la complexité, nous entrons dans « *la systémique de la complexité* » (Le Moigne, 1990). La complexité est à première vue, un phénomène quantitatif, il

s'agit de « l'extrême quantité d'interactions et d'interférences entre un très grand nombre d'unités » (Morin, 2005, p. 48), cependant elle comprend également des incertitudes, des indéterminations, des phénomènes aléatoires. Dès lors, la complexité nous introduit dans le domaine de l'incertitude, « c'est l'incertitude au sein de systèmes richement organisés » (Morin, 2005, p. 49). La complexité serait donc liée à un certain mélange d'ordre et de désordre, porteur d'une véritable rupture épistémologique (Donnadieu, Karsky, 2002). En effet, le propre de la science a toujours été de réduire l'aléa, l'imprécision ou la contradiction. Or il faut maintenant accepter une certaine imprécision, une incertitude dans les phénomènes mais également les concepts.

Prenons l'exemple d'un modèle de dynamique des systèmes relativement simple expliquant les relations entre revenu, consommation, épargne, investissement et production.

*Figure 30 : Un CLD reliant la consommation à la production*



*Source : L'auteur*

Ce modèle peut comporter plusieurs boucles : une boucle de renforcement R1 précisant la relation entre revenu, consommation, production, emplois, salaires et revenus ; une boucle de renforcement R2 empruntant le chemin revenu, épargne, investissement, production, emplois, salaires et revenus ; une boucle R3 partant du revenu pour aller vers la consommation, les prix, la production, l'emploi, les salaires et les revenus ; une boucle de renforcement R4 entre la production et la consommation ; et enfin une boucle de régulation B1 entre la consommation et les prix (la



augmenter les coûts de production. La hausse des taux d'intérêt peut réduire le recours au crédit et renchérir le coût de l'investissement. Ces nouvelles relations enrichissent le CLD et permettent de mieux appréhender la dynamique du système économique.

Au-delà du niveau de détails et de sophistication du modèle, la véritable question est « *quel est le problème auquel on souhaite répondre ?* ». C'est cette question qui fixera les limites de notre modèle et qui amènera à faire plus d'investigations ou à se contenter des relations que l'on a identifiées dans le CLD.

## Causalités vs Corrélations (étape 9)

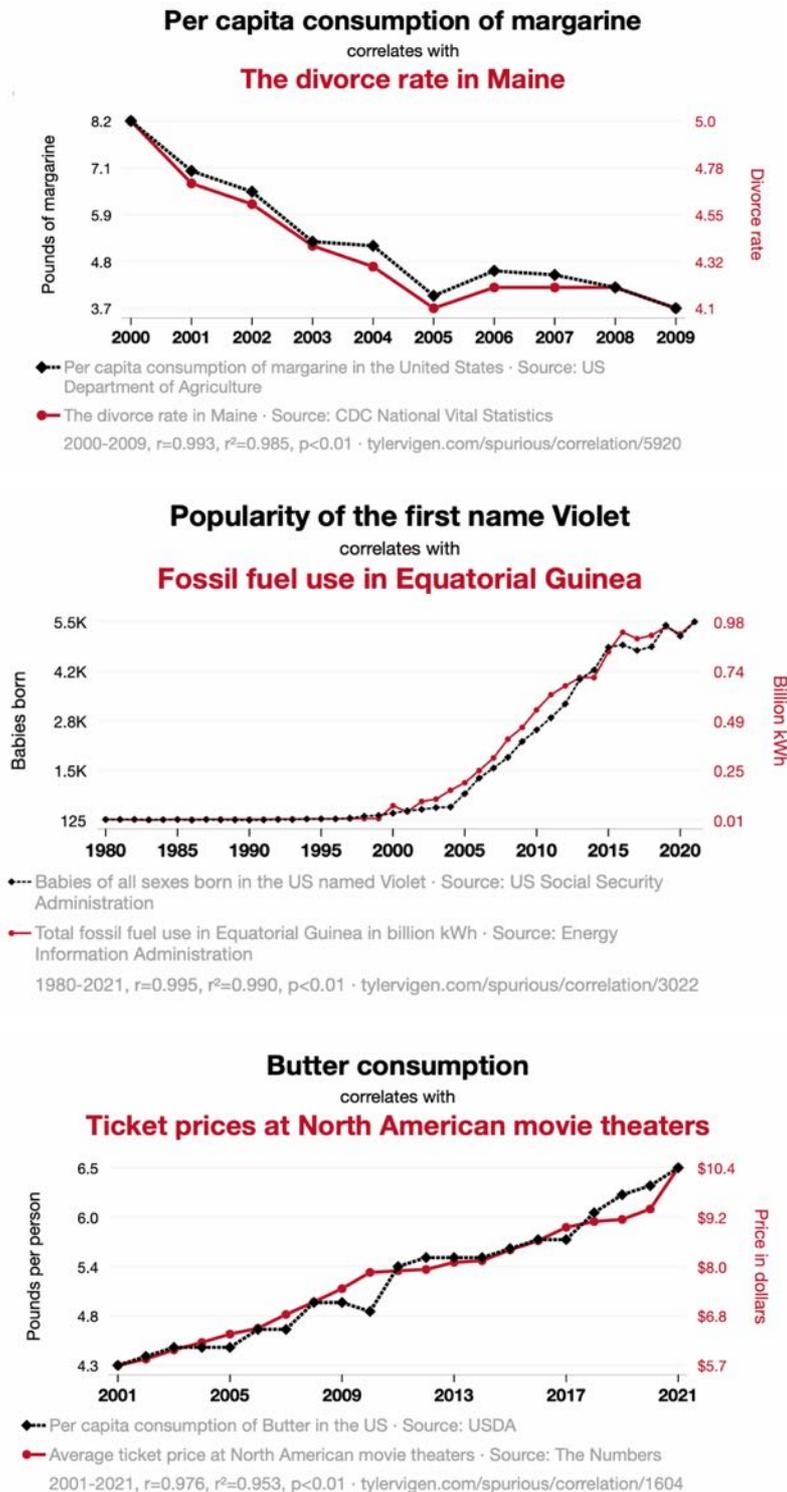
Nous abordons ici l'une des étapes clés de la dynamique des systèmes. Pourquoi n'intervient-elle qu'à l'étape 9 ? Nous sommes partis du postulat que l'analyse des chaînes de causalité étaient au cœur de la dynamique des systèmes et que les boucles de rétroaction permettaient de cerner le comportement dynamique d'un système. Or, cette approche ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique, notamment du côté des économistes, qui préfèrent se référer à l'outil statistique et à la notion de corrélation. Il existe une grande différence entre les notions de corrélation et causalité. En statistique, la corrélation est une mesure qui démontre à quel point deux variables sont liées linéairement. C'est un outil utilisé pour exprimer les relations entre les variables sans faire de déclaration sur la cause et l'effet. La causalité est une mesure statistique de la relation entre deux variables où une variable est affectée par l'autre. Cela se produit lorsque la valeur d'une variable augmente ou diminue à la suite d'un changement dans l'autre variable.

La corrélation et la causalité sont donc deux concepts différents qui peuvent exister en même temps, bien que l'un n'implique pas nécessairement l'autre. Comme nous l'avons vu plus haut, la causalité se produit lorsqu'une variable en affecte une autre, tandis que la corrélation implique simplement une relation entre les deux variables. Bien que la causalité indique une relation entre deux variables, nous ne pouvons pas toujours supposer la causalité parce qu'une association peut avoir lieu pour différentes raisons. Tyler Vigen (2014-2015)<sup>22</sup> a donné de nombreux exemples de ce qu'il appelle les corrélations parasites (*Spurious correlations*), faussant le jeu de la compréhension de certains phénomènes : corrélations entre la consommation de margarine par individu et le taux de divorce dans l'Etat du Maine, entre la popularité du nom Violet et la consommation de pétrole en Guinée équatoriale, ou encore la consommation de beurre et les prix d'entrée dans les cinémas américains.

---

<sup>22</sup> <https://tylervigen.com/spurious-correlations>

Figure 32 : Les Spurious Correlations



Si la causalité fait partie du vocabulaire en dynamique des systèmes, c'est surtout pour rappeler que tous les systèmes complexes fonctionnent sous la forme de boucles de rétroaction (positives ou négatives) en interactions. La causalité précise que deux variables sont liées par une chaîne d'évènements dont chacun dépend directement de son prédécesseur (Halper, Perl, 2005). Cette causalité est constituée de deux éléments : (i) les variables et les liens qui traduisent des relations, (ii) un indicateur de force des

liens via la notion de polarité. Dans un diagramme de boucles causales, la relation de cause à effet peut très vite se trouver « noyée » dans un ensemble de nœuds qui augmente avec la taille et le niveau de détails du CLD. Afin d'éviter une certaine confusion entre les causes et les effets, la dynamique des systèmes impose des règles formelles strictes pour le diagramme des boucles causales. Seules les variables qui se trouvent dans la chaîne causale font partie de l'ensemble des variables modélisées (notamment des variables endogènes). Ce sont les équations structurelles qui vont représenter la manière dont un événement dans une variable est causé par des événements dans les variables précédentes. De ce fait, la cause d'un événement peut être décelée automatiquement si nous disposons d'un diagramme causal qui satisfait aux conditions formelles du problème posé, des équations structurelles et que nous connaissons les valeurs des variables contextualisées.

Notons ici que la principale préoccupation en dynamique des systèmes est de comprendre comment la structure (variables et liens de causalité) génère un comportement dans un monde de processus continus. Dès lors, la causalité ne s'attache pas à comprendre la manière dont les événements causent les événements, mais bien la manière dont le comportement cause le comportement (par le biais d'une structure causale, Schaffernicht, 2007). Dans un monde constitué de variables de flux et de stocks, les stocks ont une valeur spécifique à chaque instant alors que les flux sont définis pour une période de temps donné. Même si nous sommes capables de percevoir un comportement à partir de séquences de perceptions ou de changements d'état, seules les variables de stocks peuvent être directement perçues et symbolisent la relation causale. Ce dernier point est fondamental, il rappelle qu'un modèle bâti sur une chaîne de causalité, ne peut se passer de stocks. Les flux ne sauraient donc constitués à eux seuls une chaîne de causalité !

## Les points leviers - Leverage points (étape 10)

L'étude d'un système, plus précisément celle des drivers (variables qui impulsent la dynamique) et des boucles de renforcement/régulation, permet de mettre en lumière les points leviers. D'une manière générale, les systèmes que l'on conçoit, génèrent leur propre dynamique et l'on repère assez vite les leviers sur lesquels agir. Mais il existe des systèmes, notamment ceux que l'on doit créer à partir de rien (models for scratch) qui soulèvent de réelles difficultés (comment appréhender le comportement d'un système structurel complexe). Utilisant le langage de la dynamique des systèmes (flux d'entrée, flux de sortie, stocks, paramètres, délais, état d'un système...), Donella Meadows (1999) a suggéré une liste de points leviers en les ordonnant du plus simple au plus complexe.

Tableau 7 : Les points leviers d'un système (par ordre décroissance, du plus superficiel au plus transformateur)

12) Constants, parameters, numbers (such as subsidies, taxes, standards)	6) The structure of information flows (who does and does not have access to what kinds of information)
11) The sizes of buffers and other stabilizing stocks, relative to their flows.	5) The rules of the system (such as incentives, punishments, constraints)
10) The structure of material stocks and flows (such as transport networks, population age structures)	4) The power to add, change, evolve, or self-organize system structure
9) The lengths of delays, relative to the rate of system change	3) The goals of the system
8) The strength of negative feedback loops, relative to the impacts they are trying to correct against	2) The mindset or paradigm out of which the system—its goals, structure, rules, delays, parameters—arises
7) The gain around driving positive feedback loops	1) The power to transcend paradigms

Source : Meadows (1999)

Cette liste devait constituer un programme de recherche cependant elle s'est très vite révélée être un excellent guide pour identifier les façons d'intervenir dans un système (Davelaar, 2021). Appliqué au système énergétique et de manière plus générale à la transition écologique ou au passage à l'économie circulaire, ce guide constitue une excellente boussole méthodologique.

Tableau 8 : Description des leviers

N°	Levier	Description
12	Constantes et paramètres	Permet d'ajuster les seuils via des taxes, subventions ou des normes
11	Taille des tampons (stocks)	Capacité de stockage ou d'absorption d'un système
10	Flux et structures	Où vont les flux ? Qui les contrôle ?
9	Retards	Délais de réaction entre action et effet
8	Boucles de régulation	Mécanismes de rétroaction négative
7	Boucles d'amplification	Rétroactions positives (effet cascade, boule de neige)
6	Structure d'informations	Ce qui est mesuré, diffusé, su, compris...
5	Règles du système	Lois, normes, conventions, incitations
4	Auto-organisation	Capacité à changer les règles du jeu
3	Buts du système	Objectifs explicites mais également implicites
2	Paradigme	Vision du monde
1	Pouvoir de transcender les paradigmes	Capacité à changer de cadre de penser

Source : Diemer (2012)

Passons en revue ces 12 leviers afin de cerner leur niveau d'opérationnalité dans un système.

#### Levier 12. Constantes, paramètres, nombres

Ce que l'on a coutume d'appeler paramètres, sont souvent des constantes. Il s'agit de nombres qui déterminent l'ampleur d'un écart ou qui ont pour fonction de quantifier de manière succincte un système. Les paramètres sont avant tout des éléments d'information (souvent quantitatifs) intervenant dans la description d'un système ou dans une prise de décisions. Les paramètres sont des points de moindre influence dans

un système car ils changent rarement le comportement. Ainsi une certification ou un label empêchant l'abattage des arbres ne fera pas disparaître les coupes importantes de bois, une norme limitant la pollution ne rendra pas l'air plus respirable, une subvention pour installer des panneaux solaires ne réduira pas forcément la consommation d'énergies fossiles, une taxe carbone ne sera pas forcément suivie d'une chute des émissions de CO<sub>2</sub>, une subvention pour rénover ou isoler son logement ne fera pas automatiquement chuter la facture d'énergie (effet rebond). Précisons ici que les paramètres sont généralement destinés à se retrouver dans des intervalles modérés, autrement dit, les paramètres n'ont pas pour vocation d'être associés à des valeurs critiques ou extrêmes.

*Levier 11. La taille des stocks par rapport aux flux*

Les stocks jouent le rôle de tampon, ils permettent d'éliminer de trop fortes tensions sur les flux d'entrée et les flux de sortie. Les industriels s'arrangent toujours pour avoir un stock minimum qui leur évite de produire trop et surtout de voir des clients insatisfaits par le manque de marchandises. Les grandes surfaces qui ont un rôle important dans la distribution des produits alimentaires, ne peuvent se permettre de laisser leurs rayons vides et doivent continuellement les alimenter en fonction des achats de leurs clients. Les stocks ont un véritable pouvoir de stabilisation dans un système, notamment des prix.

*Levier 10. La structure des stocks et des flux de matières et les nœuds d'intersection*

La structure des stocks, les flux de matières et les nœuds d'intersection s'apparentent au squelette d'un système, ce sont très souvent des infrastructures et des interrelations qu'il est difficile de modifier (c'est généralement coûteux et lent). Le passage d'une flotte de véhicules thermiques à une flotte de véhicules électriques peut être un point de basculement dans un scénario de neutralité carbone, toutefois cela risque de prendre beaucoup de temps (il faut près de 20 ans pour renouveler une flotte complète) et nécessiter beaucoup d'argent (le prix des voitures électriques, les subventions).

*Levier 9. La durée des retards, par rapport à la vitesse des changements dans le système*

Les retards dans les boucles de rétroaction sont les causes principales des oscillations. Lorsque l'on essaie d'ajuster l'état d'un système à un objectif préfixé, mais que l'on reçoit que des informations retardées sur l'état du système, on risque de surestimer ou sous-estimer l'objectif. Il en va de même si vos informations sont pertinentes et opportunes, mais que votre réponse ne l'est pas. Par exemple, il faut plusieurs années pour construire une centrale nucléaire, ensuite cette centrale entre en fonctionnement pour une durée de 25, 30 ou 40 ans. Ces délais font qu'il est impossible de construire exactement le bon nombre de centrales pour répondre à une demande d'énergie qui évolue rapidement. Malgré d'immenses efforts de planification, presque toutes les industries énergétiques centralisées du monde connaissent des oscillations entre

surcapacité et sous-capacité. Un système ne peut tout simplement pas répondre aux changements à court terme lorsqu'il a des retards à long terme. Donella Meadows rappelle « *qu'un délai dans un processus de rétroaction est critique par rapport aux taux de changement de l'état du système que la boucle de rétroaction tente de contrôler* » (1999, p. p. 8). Des délais trop courts entraînent des réactions excessives, des oscillations amplifiées par l'instabilité de la réponse. Les délais trop longs provoquent des oscillations amorties, soutenues ou explosives, en fonction de la longueur du délai. À l'extrême, ils peuvent provoquer le chaos. Des délais trop longs dans un système doté d'un seuil ou d'une limite (on pense ici aux limites planétaires) au-delà de laquelle des dommages irréversibles peuvent se produire, entraînent une surchauffe et un effondrement. La longueur des délais est un point de levier élevé (les délais ne sont généralement pas modifiables). S'inscrire dans un cadre décroissant, visant à réduire la consommation et/ou la production est un point levier important en termes de délais... La prise de conscience de la nécessité de moins consommer et la baisse réelle de la production qui sort des usines, font que les choses prennent le temps qu'elles prennent.

*Levier 8. La force des boucles de rétroaction négative, par rapport aux impacts qu'elles tentent de corriger contre les effets de l'environnement*

Les boucles de rétroaction négative sont omniprésentes dans les systèmes. La nature en contient de nombreuses (plus de proies engendrent plus de prédateurs qui peuvent réguler la population de proies) et l'espèce humaine les introduit pour contrôler et maintenir les différents états d'un système dans des limites acceptables. Toute boucle de rétroaction négative a besoin d'un objectif (la neutralité carbone), d'un dispositif de surveillance et de signalisation pour détecter les écarts par rapport à l'objectif (bilan de gaz à effet de serre) et d'un mécanisme de réponse (l'utilisation d'énergies renouvelables, la baisse des importations d'énergie fossile). Selon Donella Meadows, « *l'une des grandes erreurs que nous commettons est de supprimer ces mécanismes de réponse d'urgence* » parce qu'ils ne sont pas souvent utilisés et qu'ils semblent coûteux. À court terme, nous n'en voyons pas l'effet. À long terme, nous réduisons considérablement l'éventail des conditions dans lesquelles le système peut survivre » (1999, p. 10). La planification souvent remplacée par la prévision est un exemple de mécanisme de réponse qui a complètement disparu des ministères.

La force d'une boucle négative (c'est à dire sa capacité à maintenir le stock désigné au niveau ou à proximité de l'objectif préfixé) dépend de la combinaison de tous ses paramètres et de ses multiples relations avec d'autres boucles du système. Elle est importante par rapport à l'impact qu'elle est censée corriger. Si l'impact augmente, les rétroactions doivent également être renforcées. Dans le cas du réchauffement climatique, un monde à +1.5C° ou + 4°C suppose une baisse radicale des émissions de GES, soit la possibilité de refuser une activité qui émettrait beaucoup trop de gaz à effet de serre.

Levier 7. Le gain lié à la conduite de boucles de rétroaction positives

Si une boucle de rétroaction négative se corrige d'elle-même, une boucle de rétroaction positive a tendance à se renforcer d'elle-même. Plus elle fonctionne, plus elle gagne en puissance pour fonctionner davantage. Autrement dit, le développement du numérique engendre l'apparition de nouveaux usages et donc la consommation de plus d'énergie et l'émission de gaz à effet de serre. Les boucles de rétroaction positive sont des sources de croissance, d'explosion, d'érosion et d'effondrement des systèmes. Un système dont la boucle de rétroaction positive n'est pas contrôlée finit par s'autodétruire. Normalement, les boucles de rétroaction positives sont peu nombreuses. Des boucles négatives se mettent en place tôt ou tard pour réduire la source de la croissance. La consommation d'énergie par habitant est liée au taux de croissance de la population, lorsque le taux de mortalité (décès liés au réchauffement climatique par exemple) augmente, alors la population doit *baisser et la consommation d'énergie également*. Selon Donella Meadows, « *la réduction du gain autour d'une boucle positive - le ralentissement de la croissance, par exemple - est généralement un point de levier plus puissant dans les systèmes que le renforcement des boucles négatives, et est de loin préférable au fait de laisser la boucle positive s'écouler* » (1999, p. 11). Les boucles de rétroaction positive ont également tendance à générer deux effets : (1) d'une part, elles récompensent les gagnants en leur donnant plus de moyens pour gagner encore plus (les ménages riches peuvent s'équiper en climatiseur, panneaux solaires et/ou pompes à chaleur, bénéficier de niches fiscales dans leur choix d'investissement...). C'est pourquoi, il est plus efficace d'affaiblir les boucles positives (réduire les niches fiscales, mise en place d'un impôt sur le capital, hausse des campagnes de sensibilisation à l'environnement...) que de mettre en place des boucles négatives. (2) d'autre part, elles peuvent enclencher des situations de chaos (notamment lorsqu'elles ont des rotations rapides). Ce comportement se produit lorsqu'un système commence à changer beaucoup plus vite que ses boucles négatives ne peuvent réagir. Ainsi, l'investissement massif dans les énergies renouvelables, non stockables et à production très fluctuante (le vent pour les éoliennes, les flux énergétiques pour les panneaux solaires), peut générer des situations de block out si elles représentent une part trop élevée du mix énergétique (part qui peut aller de 65 à 85%). L'existence de telles boucles doit nous amener à fixer des limites car les oscillations risquent d'être très puissantes. Le contrôle de ces boucles consistera à les ralentir

Levier 6. La structure des flux d'information

Un système est composé de flux de matières, d'énergie mais également d'informations. Or la structure des flux d'information peut constituer un point levier important. Comme le rappelle Donella Meadows, « *il ne s'agit pas d'un ajustement de paramètres, ni d'un renforcement ou d'un affaiblissement d'une boucle existante. Il s'agit d'une nouvelle boucle, qui fournit des informations à un endroit où elles n'allaient pas auparavant et qui, par conséquent, amène les gens à se comporter différemment* » (1999, p. 13). En obligeant les industries à révéler les informations relatives aux rejets toxiques de polluants, le

législateur a permis à la communauté civile et scientifique de prendre connaissance de ces émissions chaque année. Il existe depuis des décennies, des réglementations destinées à réduire les sources de pollution. C'est très souvent l'absence de retour d'informations qui est l'une des causes les plus courantes de dysfonctionnement des systèmes. L'ajout ou le rétablissement d'informations peut constituer une intervention puissante (il est donc important que le retour d'information manquant soit rétabli au bon endroit et sous une forme contraignante).

#### *Levier 5. Les règles du système*

Les règles du système définissent son champ d'application, ses limites, ses degrés de liberté. Les lois physiques telles que les lois de la thermodynamique (Georgescu-Roegen, 1975) ou les lois de l'écologie (Commoner, 1971) engendrent des règles absolues. Que nous les comprenions ou pas, elles s'imposent à nous. Les lois humaines telles que les constitutions sont également des règles sociales fortes (elles définissent nos droits et nos devoirs). Les conventions sociales ou collectives, les accords de branche, les sanctions ou amendes sont quant à elles des règles dont la portée est plus faible. Le pouvoir des règles est un point d'appui important dans les systèmes. Donella Meadows rappelle que « *le pouvoir sur les règles est un véritable pouvoir* » (1999, p. 14).

#### *Levier 4. Le pouvoir d'ajouter, de modifier, d'évoluer ou d'auto-organiser la structure du système*

Les systèmes vivants et sociaux ont la capacité de changer complètement en créant des structures et des comportements entièrement nouveaux. Dans les systèmes biologiques, on parle d'évolution. Dans les sociétés humaines, on parle de progrès technique ou de révolution sociale. Dans le langage systémique, on parle d'auto-organisation. Selon Donella Meadows, « *l'auto-organisation consiste à modifier n'importe quel aspect d'un système situé plus bas dans la liste : ajouter des structures physiques entièrement nouvelles, telles que des cerveaux, des ailes ou des ordinateurs ; ajouter de nouvelles boucles négatives ou positives : établir de nouvelles règles* » (1999, p. 14). La capacité d'auto-organisation renvoie directement (1) à la résilience d'un système (un système est capable de s'adapter aux chocs exogènes - conflit énergétique entre des grandes puissances - ou endogène - émergence d'une innovation ou d'une nouvelle technologie - en se modifiant lui-même) et (2) à l'existence de règles qui régissent son fonctionnement. D'une certaine manière, l'auto-organisation puise dans un stock d'information (de connaissances) afin de sélectionner le modèle le plus adapté à la situation du moment. En dynamique des systèmes, cette sélection s'appuie principalement sur l'expérimentation et l'expérience.

#### *Levier 3. Les objectifs du système*

Le(s) but(s) d'un système est un point levier, supérieur à la capacité d'auto-organisation du système lui-même. Le diagramme des boucles causales montre que la plupart des boucles de rétroaction négative d'un système ont des objectifs : augmenter les énergies renouvelables pour réduire nos émissions de GES et atteindre l'objectif de

neutralité carbone, stocker de l'eau à l'aide de barrages pour produire de l'énergie hydraulique. Selon Donella Meadows, ces objectifs sont « *des points d'appui importants pour les systèmes* » (1999, p. 16). Mais il existe des objectifs plus vastes, moins évidents et à effet de levier plus élevé, ceux du système dans son ensemble. On peut citer l'efficacité, la durabilité, la résilience, l'équité ou encore la circularité (Diemer, 2012). Des objectifs qui ne sont pas toujours compatibles les uns avec les autres.

### Levier 2. L'état d'esprit ou le paradigme dont le système est issu

Une idée partagée par l'ensemble de la société constitue le paradigme de cette société, ou l'ensemble des croyances les plus profondes sur la façon dont le monde fonctionne. C'est une vision du monde implicite, rarement remise en cause, mais qui influence tous les choix et comportements d'un système. Changer de paradigme, c'est modifier la manière même de définir un problème, des valeurs, des priorités, des objectifs... Les paradigmes sont à l'origine des systèmes. Ils forgent les objectifs du système, font circuler des flux d'informations, engendrent des boucles de rétroaction mobilisant des stocks et des flux. Donella Meadows rappelle que si « *les paradigmes sont plus difficiles à changer que n'importe quel autre élément d'un système et que, par conséquent, ce point devrait être le plus bas de la liste, et non pas le deuxième plus haut... Il n'y a rien de nécessairement physique ou coûteux ou même lent dans le processus de changement de paradigme. Chez un seul individu, il peut se produire en une milliseconde. Il suffit d'un déclic dans l'esprit, d'une chute d'écailles des yeux, d'une nouvelle façon de voir* » (1999, p. 18) ». Par contre, les sociétés résistent aux défis lancés aux changements de paradigme. A l'image des travaux de Thomas Kuhn, le changement de paradigme consiste à souligner les anomalies et les échecs de l'ancien paradigme, à parler plus fort et avec assurance du nouveau paradigme, à placer des personnes du nouveau paradigme dans des lieux visibles et de pouvoir. En dynamique des systèmes, le changement de paradigme apparaît via la modélisation du système, c'est le passage du diagramme de boucles causales observé au diagramme des boucles causales modifié, compte tenu des points leviers et des points de basculement.

### Levier 1. Le pouvoir de transcender les paradigmes

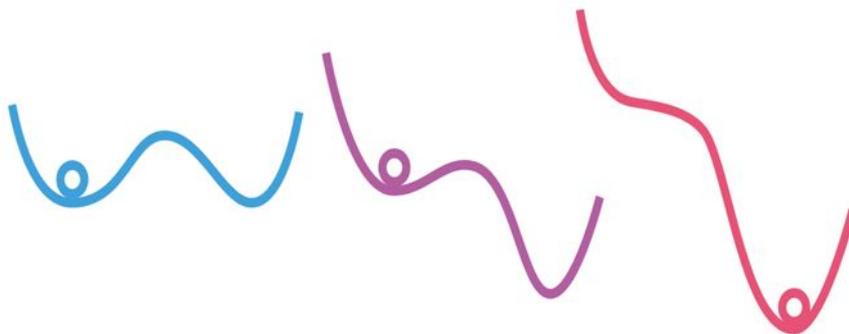
Il existe un point de levier qui est encore plus important que le changement de paradigme, c'est la capacité à transcender les paradigmes eux-mêmes. Il s'agit de ne pas s'attacher à un paradigme mais de rester flexible et ouvert, de réaliser qu'aucun paradigme n'est « vrai », que chacun d'entre eux, y compris celui qui a été façonné par notre propre vision du monde, est une compréhension limitée et figée. A l'image du *Macroscop* de Joël de Rosnay (1974), il ne s'agit pas simplement de changer de paires de lunettes pour en adopter une autre, mais de comprendre que toutes nos lunettes n'offrent qu'une vision temporaire et limitée. Le chercheur en dynamique des systèmes doit rester humble, faire preuve de réflexivité et de souplesse intellectuelle. Transcender un paradigme revient : (1) à identifier les différents paradigmes existants. Il convient de dissocier le paradigme dominant d'un nouveau paradigme possible. Si ces deux paradigmes sont opposés, il s'agit avant tout de ne pas s'enfermer dans une



Dans l'usage courant, un point de bascule est le moment où un petit changement fait une grande différence dans un système (Gladwell, 2000), c'est "le point auquel une série de petits changements ou incidents devient suffisamment significative pour provoquer un changement plus grand et plus important" (Oxford English Dictionary). Un système est un groupe d'éléments interactifs ou interdépendants qui agissent selon un ensemble de règles communes pour former un tout reconnaissable et unifié - par exemple, une économie. Un point de basculement est un type de seuil. Le petit changement qui fait qu'un système passe un point de basculement peut être décrit comme un déclencheur. Le changement important qui en résulte, s'apparente à un changement qualitatif de l'aspect ou du fonctionnement d'un système - par exemple, le passage d'une économie alimentée par des combustibles fossiles à une économie alimentée par des énergies renouvelables.

La question des points de basculement renvoie à la position de ces points dans une structure de comportement (c'est la forme mathématique ou graphique que prend une fonction).

*Figure 34 : Les points de bascule et les structures de comportement*



*Source : Gladwell, 2000*

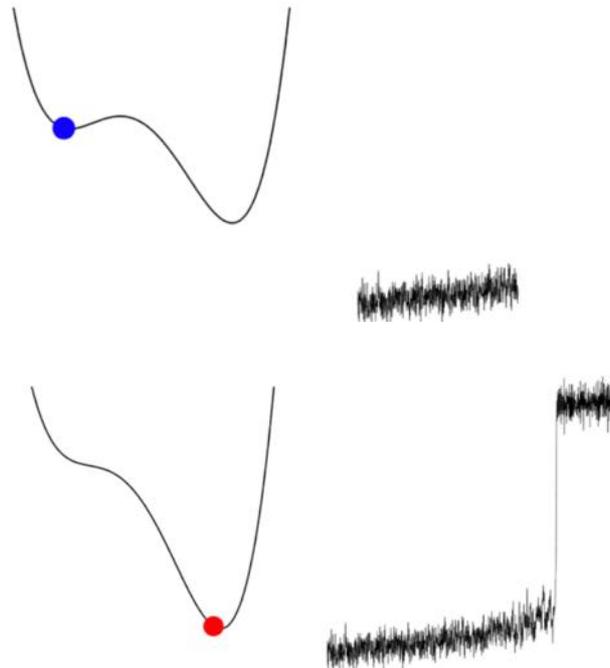
Le système commence (en bleu) dans l'un des deux états stables possibles, représenté par la boule dans la vallée de gauche. Sous l'effet d'un forçage externe au fil du temps (de gauche à droite), cet état perd de sa stabilité (violet), ce qui se traduit par une vallée de moins en moins profonde et un abaissement du sommet de la colline. Passé un point de basculement, l'état stable initial disparaît et le système subit un changement brusque et auto-propulsé vers l'autre état stable restant (rouge).

Le changement associé au passage d'un point de basculement comprend généralement les qualités suivantes :

- la brusquerie (le changement est rapide par rapport aux facteurs qui le forcent) ;
- l'auto-perpétuation (le changement se poursuit même si le forçage est supprimé, jusqu'à ce qu'un nouvel état soit atteint) ;
- l'irréversibilité (le changement est difficile ou impossible à inverser) (Milkoreit et al., 2018).

Concrètement, deux effets interviennent : (1) des amplitudes et donc des écarts-types qui s'éloignent de la moyenne (la fonction reste cependant continue, point bleu sur la courbe), (2) un décrochage (passage à un palier supérieur ou inférieur) qui va rompre la continuité de la fonction (logique de temps discret).

*Figure 35 : Les points de bascule, une sorte de décrochage du système*



*Source : L'auteur*

Dès lors, un point de basculement se produit lorsque le changement dans une partie d'un système devient auto-entretenu au-delà d'un seuil, entraînant un impact substantiel, généralisé, fréquemment abrupt et souvent irréversible (inspiré par Armstrong McKay et al., 2022 et Milkoreit et al., 2018). Cette définition inclut les possibilités de points de basculement non interrompus et réversibles.

Les qualités des points de basculement décrites ci-dessus peuvent résulter de plusieurs caractéristiques génériques des systèmes dans lesquels ils se produisent et des forces auxquelles ils sont soumis. Un mécanisme de rétroaction (ou boucle de rétroaction) est une boucle fermée de causalité par laquelle un changement dans un système se répercute en amplifiant ou en atténuant ce changement. Les mécanismes de rétroaction peuvent être mathématiquement positifs ou négatifs, selon qu'ils amplifient ou atténuent les effets d'un changement. Le basculement peut se produire lorsque les mécanismes de rétroaction amplificateurs/renforçants (positifs) dépassent les mécanismes amortisseurs/équilibrants (négatifs) et deviennent suffisamment puissants pour soutenir un changement qui se perpétue de lui-même.

### Illustration 1 : La forêt amazonienne

L'Amazonie génère sa propre pluie grâce à l'évapotranspiration des arbres. Si la déforestation et le réchauffement dépassent un certain seuil (estimé à 20-25% de perte de couverture forestière), la forêt pourrait ne plus maintenir son cycle hydrologique. L'une des conséquences pourrait être le basculement vers une savane sèche, avec perte massive de biodiversité et libération de milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (Nobre, Lovejoy, 2019).

### Illustration 2 : L'adoption de la voiture électrique

Initialement, le monde fait face à une adoption lente des véhicules électriques car ces voitures sont chères, il y a peu d'infrastructures de recharge, et un certain scepticisme des consommateurs sur leur autonomie kilométrique. Le point de bascule intervient lorsqu'un certain pourcentage de la population adopte les voitures électriques (15 à 20% des ventes annuelles, AIE, 2022), cela déclenche alors une baisse des coûts de production (économie d'échelle), une multiplication des bornes de recharge et un effet de norme sociale (les ménages cherchent à s'équiper en voiture électrique). Economiquement, le point de bascule illustre le passage d'un marché de niche à un marché de masse (Rogers, 1962 ; Diemer, 2000). Environnementalement, le point de bascule illustre le passage d'une émission importante de CO<sub>2</sub> à une sorte de neutralité carbone.

### Illustration 3 : La baisse de la consommation

En période de crise (hausse du prix du pétrole, augmentation du prix des aliments, inflation), les ménages réduisent leurs dépenses (suite à une dégradation de leur pouvoir d'achat. Si la confiance des ménages chute au-delà d'un certain seuil, la baisse de la consommation devient auto-entretenu (Keynes, 1936). La boucle de renforcement (+) s'intensifie : consommation (signe -), production (signe -), licenciement (signe -) consommation (signe -). Une spirale récessive apparaît et peut être difficile à enrayer sans intervention publique (logique des trappes, Krugman, 1998).

## Le diagramme des stocks et des flux (étape 12)

La distinction entre stock et flux est au cœur de la dynamique des systèmes (Forrester, 1956, 1958 ; 1960, 1961). Les stocks sont des variables d'état (state variables), ils s'accumulent sur le temps en fonction des flux entrants et des flux sortants du système étudié. Le différentiel entre les flux entrants et les flux sortants apparaît sous la forme d'un taux net d'accumulation. L'intégration des stocks sur une période donnée (intégrale mathématique) donne la dynamique temporelle de la variable étudiée. Notons que les flux pris en compte sont à la fois des flux biophysiques (c'est le stock d'eau d'une baignoire alimentée par un robinet et réduit par un bouchon d'évacuation) et des flux d'informations. Dans ce dernier cas, l'accumulation

d'informations peut s'apparenter à un stock de connaissances, alimenté par de nouvelles informations et diminué par des pertes d'informations.

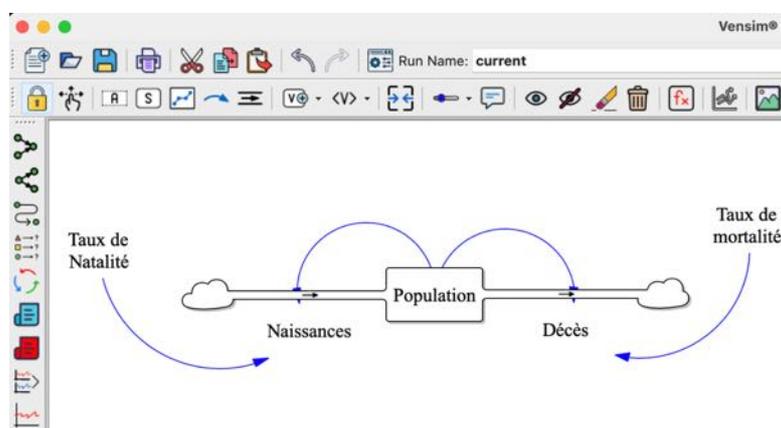
Le diagramme stocks – flux (SFD) sert à représenter graphiquement la structure d'un système complexe en distinguant les stocks (ce qui s'accumule dans le temps, capital, population, ressources naturelles, voitures...) et les flux (ce qui croître ou décroître les stocks, les naissances/décès, la production/la consommation, les ventes/les rebuts...).

Le diagramme stocks-flux (SFD) nous fait entrer dans le domaine de la modélisation et de la quantification. Comme le rappelle Forrester (1961), le diagramme stocks flux permet de produire des simulations informatiques, susceptibles de générer des trajectoires des systèmes complexes dans le temps.

Sous Vensim, Stella ou insight maker, le diagramme stocks flux a des caractéristiques bien définies. Les stocks (on parle de variables d'état) sont représentés par des rectangles, ils ont une mémoire et une valeur (qui dépendent du passé – valeur initiale – et de l'intégration des flux. Une population totale est ainsi évaluée à une date donnée. Les flux (on parle de taux ou de débits) sont représentés par des tuyaux, des flèches directionnelles avec des valves ou des petits robinets. Ce sont des débits instantanés qui remplissent ou vident les stocks : nombre de naissances par an (flux d'entrée), nombre de décès par an (flux sortant). Les variables auxiliaires sont représentées par de petites cercles. Elles influencent les flux ou dépendent d'autres variables. On peut ainsi intégrer un prix dans la relation consommation / production, des taux de natalité et de mortalité dans la relation naissances/décès... Les flèches de dépendance : une double flèche relie les flux entrants et sortants aux stocks, une flèche simple associant des variables auxiliaires aux flux. Elles indiquent les relations de causalité et montrent « qui dépend de qui ».

Sous Vensim, le stock prend la forme d'un rectangle (ici la population), les flux d'entrée (la naissances) et les flux de sortie (décès) se traduisent par une hausse ou une baisse des stocks. Les taux de natalité et de mortalité impactent les flux d'entrée (naissances) et les flux de sortie (décès).

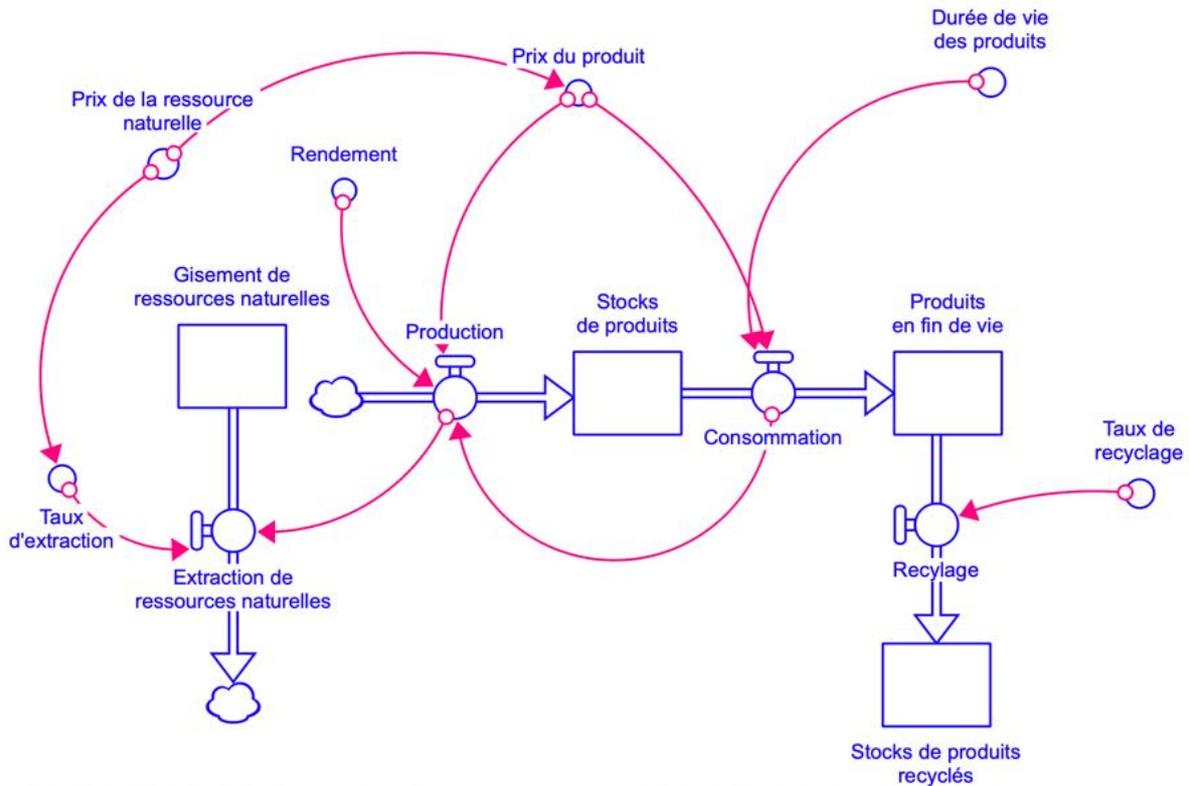
Figure 36.: Représentation d'un SFD de la population sous Vensim



Source : L'auteur

Sous Stella, les flux sont représentés par des valves. Prenons l'exemple d'une chaîne de valeur allant d'un stock de ressources naturelles à un stock de produits recyclés.

*Figure 37 : Représentation d'un SFD de l'extraction d'une ressource sous Stella*



Source : L'auteur

L'extraction de ressources naturelles, la production, la consommation sont des flux (entrée ou sortie), le SFD indique que lorsque la consommation augmente, la production augmente et il faut extraire davantage de ressources naturelles. La hausse de la consommation provoque une baisse du stock de produits, une hausse de l'extraction génère une baisse du stock de ressources naturelles. Le gisement de ressources naturelles, le stock de produits, le stock de produits en fin de vie, le stock de produits recyclés sont des variables d'état (des stocks). Le taux d'extraction, le prix de la ressource naturelle, le prix du produit, la durée de vie des produits le taux de recyclage sont des variables auxiliaires.

Le diagramme stocks-flux (SFD) est particulièrement adapté pour les systèmes comme la démographie, des produits finis (voitures), des ressources naturelles..., ce sont des phénomènes où l'on observe des accumulations (parc de véhicules, population par âge, stock de batteries, ressource de lithium...) et des flux mesurables (naissances, décès, extraction, ventes, obsolescence, recyclage...). Le SFD permet de visualiser les inerties et les retards temporels (si l'on achète plus de voitures électriques, il faut en produire davantage, le parc des voitures thermiques va se réduire, mais peut être très lentement à cause de la durée de vie des véhicules). Le SFD

est un excellent outil pour les économistes, notamment lorsqu'ils sont amenés à tester des dépenses publiques (dépenses, recettes, déficit publique, taux d'imposition, subventions, taxes...) en analysant leurs effets sur les stocks (exemple de la dette publique) au fil du temps. Finalement, le SFD est un outil pertinent pour analyse des dynamiques à long terme car les accumulations sont au cœur du problème.

Comme tout outil, le diagramme SFD soulève quelques difficultés, voir des obstacles. Premièrement, il est fréquent de faire une confusion entre les stocks et les flux. Si les naissances sont bien un flux, le nombre d'enfants est un stock. De la même manière, des voitures en circulation sont des flux, mais lorsqu'elles sont arrêtées (embouteillage) ou garées (dans un parking), elles deviennent des stocks. Deuxièmement, il pose clairement la question des frontières du système. En fonction de l'endroit où on place la frontière, le même objet peut être vu comme un stock interne ou un flux externe. Ainsi les importations de batteries au lithium est un flux vers un stock national mais il peut être également un flux externe. Troisièmement, tous les stocks ne sont pas physiques, mais réels (capital humain, confiance, réputation...). Ils sont souvent difficiles à mesurer mais essentiels dans les modèles de population. Quatrièmement, le niveau de granularité, voire de découpage, du SFD peut devenir trop fin et générer des problèmes ingérables à modéliser, ou trop grossier et provoquer des pertes d'informations. L'exemple des classes d'âge d'une population peut engendrer quelques difficultés de traitement. Cinquièmement, identifier un stock ne suffit, la phase de modélisation nécessite d'avoir une mesure initiale fiable. Si l'on veut mesurer un parc de voitures électriques en circulation, il faut avoir des informations sur les immatriculations. Si l'on souhaite mesurer un stock de batteries (même en fin de vie), il faut pouvoir évaluer la qualité de ces batteries.

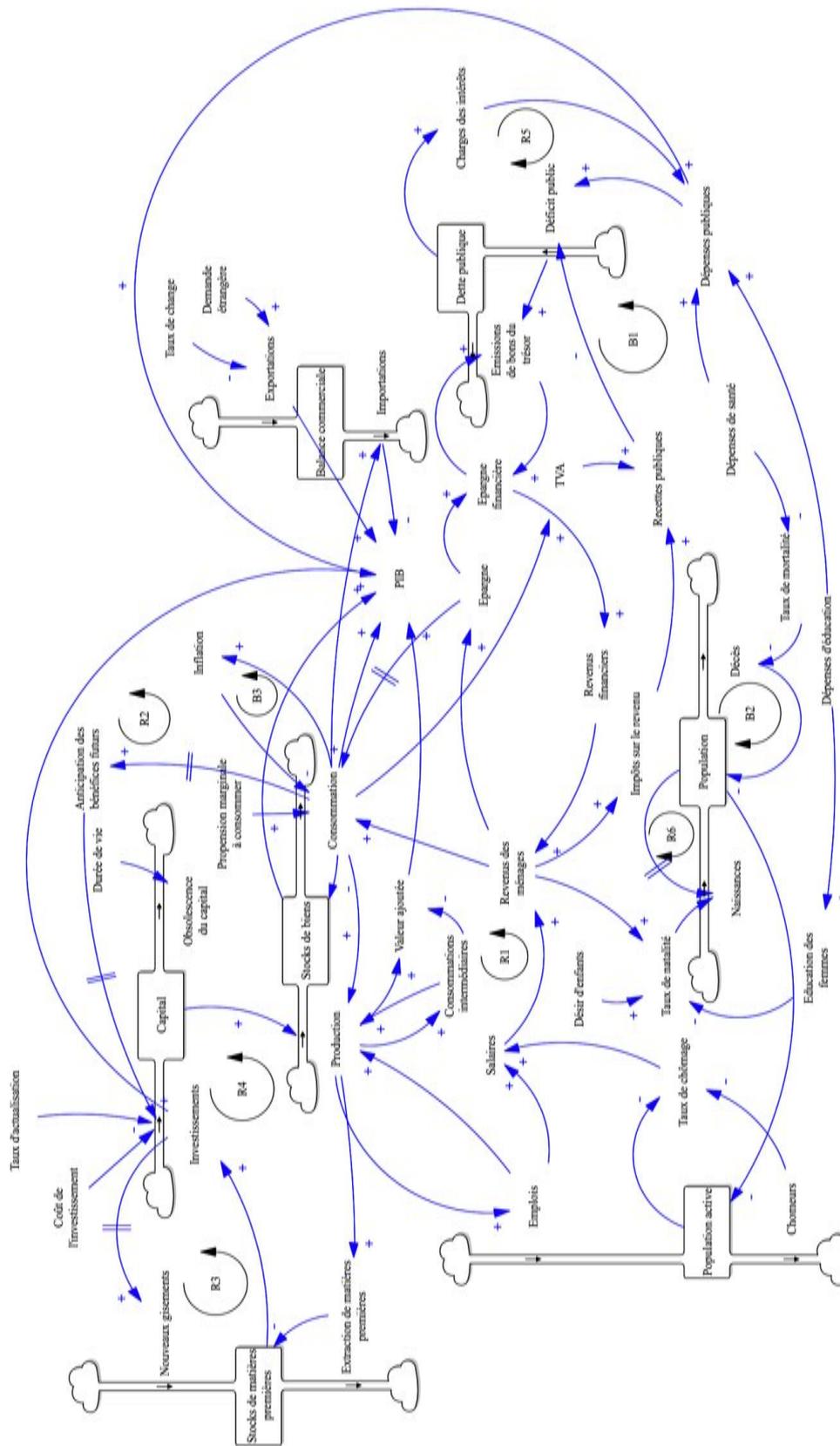
Au final, le SFD offre de nombreux avantages tout en comportant quelques inconvénients.

*Tableau 10 : Avantages et inconvénients du SFD*

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
C'est une représentation intuitive d'un système dynamique complexe	C'est une représentation structurale seulement, il convient de le compléter par des équations pour simuler.
Il présente une distinction claire entre ce qui s'accumule (stocks) et ce qui change instantanément ou avec le temps (flux)	Il peut devenir très complexe et illisible si trop de variables sont mobilisées
Il permet d'identifier les boucles de rétroaction (positives ou négatives)	Risque de subjectivité dans le choix des variables et des relations
Il favorise la pensée systémique et la compréhension des délais et des inerties	Il nécessite un minimum de compréhension pour distinguer les flux des stocks et des variables auxiliaires
Il constitue une base directe pour passer à la modélisation informatique (Vensim, Stella, Powersim, Insight Maker)	

*Source : L'auteur*

Figure 38 : SFD du système économique



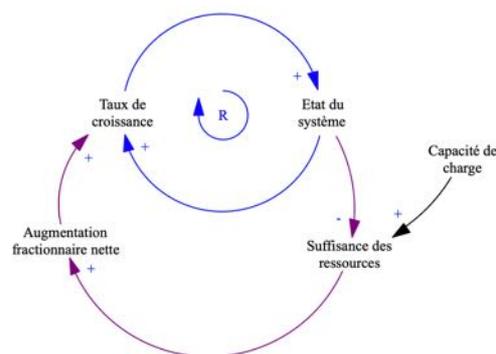


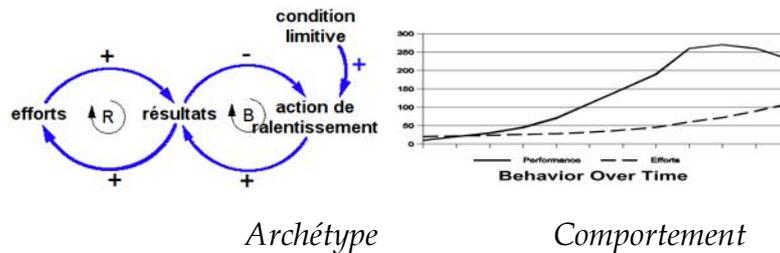
## Les Archétypes (étape 13)

En dynamique des systèmes, les archétypes sont des structures de boucles de rétroaction récurrentes qui reviennent dans de nombreux systèmes complexes (économiques, sociaux, environnementaux, industriels...). Pour reprendre le langage de la dynamique des systèmes, ce sont des modèles de comportement récurrents qui donnent un aperçu des structures qui régissent les systèmes (Meadows, 2008, Kim, 1992, 2000). Ils servent de « *patrons de comportement* » : lorsqu'on les retrouve dans la résolution d'un problème, on peut anticiper la dynamique structurelle et identifier les leviers d'action. Dans la conception d'un scénario et l'intégration de narratives, les archétypes sont des histoires types que l'on retrouve dans de nombreux modèles, même dans des contextes différents. Ces archétypes sont particulièrement utiles parce qu'ils permettent : de reconnaître rapidement les dynamiques cachées derrière des problèmes concrets, d'anticiper les effets pervers de certaines actions, et de concevoir des leviers de changement plus durables. Kim et Lannon (1997) ont identifié quatre façons d'utiliser les archétypes : (i) comme un moyen de grossissement (lentilles), il s'agit de proposer une compréhension de base des principaux enseignements, des éléments clés et des résultats à fort levier, (ii) comme modèle structurel, il s'agit d'aider un groupe à concentrer son attention sur le cœur d'un problème. (iii) comme scripts dynamiques (ou théories), lorsqu'un archétype spécifique est reconnu, il est possible d'utiliser la théorie de cet archétype pour explorer ce système ou un problème particulier, (iv) comme outils de prédiction du comportement (les archétypes de systèmes et les diagrammes de comportement dans le temps peuvent nous aider à identifier les résultats prédéterminés d'une situation particulière. Kim (1992, 2000) a identifié plusieurs types d'archétypes :

- *Les limites de la croissance* (*Limits to Growth*, Meadows & al., 1972, Randers, 1976, Meadows & al., 2002). Le cœur de cet archétype repose sur une boucle de croissance (renforçante, R) et une boucle de régulation (d'équilibre, B) liée à la ressource limitée. Ceci peut être illustré par la croissance d'une population qui consomme des ressources en abondance, cette population finit par se stabiliser et/ou décliner quand les ressources deviennent insuffisantes.

Figure 40 : Archétype des limites de la croissance

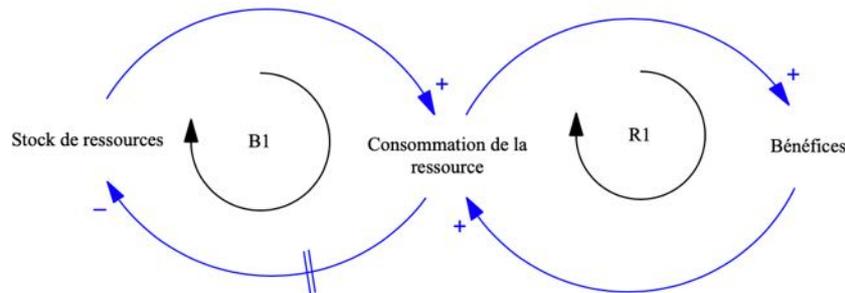




Source : Continuous Improvement Associates, 2003, Braun, 2002

- La tragédie des communs (Hardin, 1968) est un archétype de dynamique des systèmes où plusieurs acteurs exploitent une ressource en quantité limitée (eau, nourriture, poissons, espace routier...). Chaque acteur a intérêt individuellement à maximiser son usage. Mais collectivement, cela mène à la surexploitation et, in fine, à la dégradation ou à l'effondrement de la ressource. Dès lors, un comportement rationnel à l'échelle individuelle devient irrationnel à l'échelle collective.

Figure 41 : Archétype de la tragédie des communs



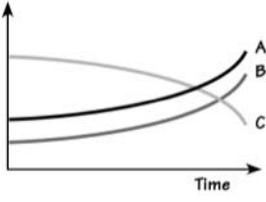
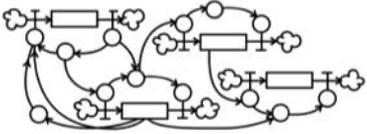
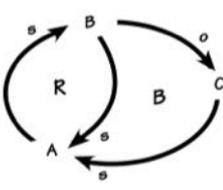
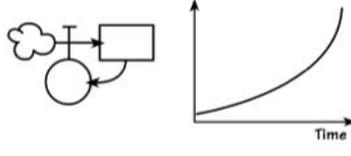
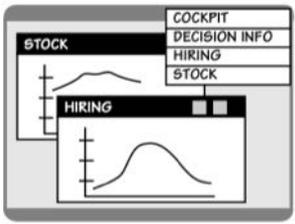
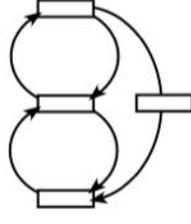
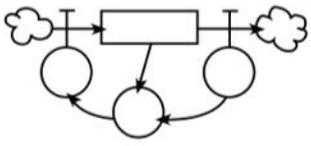
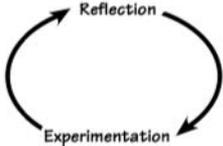
Source : L'auteur

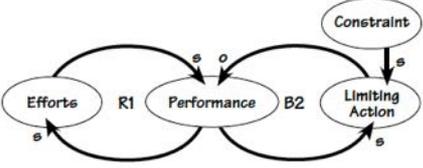
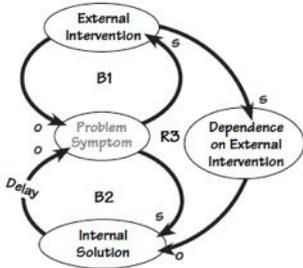
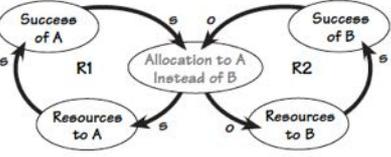
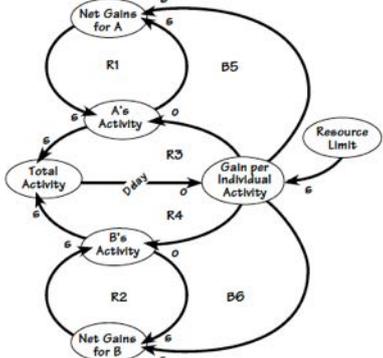
L'archétype de la tragédie des communs renvoie à plusieurs exemples : surpêche des océans, déforestation, surexploitation de l'eau des nappes phréatiques, les embouteillages via l'usage des voitures, la saturation du réseau internet, l'utilisation des énergies fossiles générant des émissions de CO2.

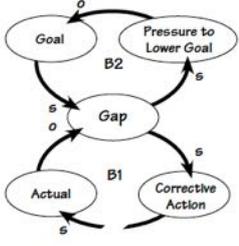
La tragédie des communs montre que les intérêts individuels non coordonnés peuvent aller jusqu'à détruire le système. La solution n'est pas nécessairement de supprimer l'usage mais de concevoir des institutions et des mécanismes qui permettent une gestion durable et collective. Les leviers d'actions consistent à réaligner les incitations individuelles avec l'intérêt collective : 1° régulation étatique tels que les quotas (pêche), la limitation (émissions de GES), règles d'usage... 2° auto-organisation communautaire (Oström, 1990) via une coopération locale, des règles collectives ou une surveillance mutuelle, 3° privatisation et/ou attribution de droits (il s'agit de transformer une ressource commune en propriété privée ou partagée (droits de pêche, licences), 4° incitations économiques (taxes, subventions, systèmes de marché du carbone).

Pour résumer, les archétypes sont une catégorie d'outils qui permettent de saisir les « histoires courantes » de la pensée systémique, c'est-à-dire les phénomènes dynamiques qui se produisent de manière répétée dans divers contextes. Ce sont des outils puissants pour diagnostiquer les problèmes et identifier les interventions à fort effet de levier qui permettront d'apporter des changements fondamentaux (Kim, 1992, 2000).

Tableau 11 : Différents types d'archétypes

DYNAMIC THINKING TOOLS	STRUCTURAL THINKING TOOLS	COMPUTER-BASED TOOLS
<p><b>Behavior Over Time Diagram</b></p>  <p>Can be used to graph the behavior of variables over time and gain insights into any interrelationships between them. (BOT diagrams are also known as reference mode diagrams.)</p>	<p><b>Graphical Function Diagram</b></p>  <p>Captures the way in which one variable affects another, by plotting the relationship between the two over the full range of relevant values.</p>	<p><b>Computer Model</b></p>  <p>Lets you translate all relationships identified as relevant into mathematical equations. You can then run policy analyses through multiple simulations.</p>
<p><b>Causal Loop Diagram</b></p>  <p>Used in conjunction with behavior over time diagrams, can help you identify reinforcing (R) and balancing (B) processes.</p>	<p><b>Structure-Behavior Pair</b></p>  <p>Consists of the basic dynamic structures that can serve as building blocks for developing computer models (for example, exponential growth, delays, smooths, S-shaped growth, oscillations, and so on).</p>	<p><b>Management Flight Simulator</b></p>  <p>Provides "flight training" for managers through the use of interactive computer games based on a computer model. Users can recognize long-term consequences of decisions by formulating strategies and making decisions based on those strategies.</p>
<p><b>Systems Archetype</b></p>  <p>Helps you recognize common system behavior patterns such as "Drifting Goals," "Shifting the Burden," "Limits to Growth," "Fixes That Fail," and so on—all the compelling, recurring "stories" of organizational dynamics.</p>	<p><b>Policy Structure Diagram</b></p>  <p>A conceptual map of the decision-making process embedded in the organization. Focuses on the factors that are weighed for each decision, and can be used to build a library of generic structures.</p>	<p><b>Learning Laboratory</b></p>  <p>A manager's practice field. Is equivalent to a sports team's experience, which blends active experimentation with reflection and discussion. Uses all the systems thinking tools, from behavior over time diagrams to MFSs.</p>

ARCHETYPE	DESCRIPTION	GUIDELINES
<p style="text-align: center;"><b>Limits to Success</b></p> 	<p>In a “Limits of Success” scenario, continued efforts initially lead to improved performance. Over time, however, the system encounters a limit which causes the performance to slow down or even decline (B1), even as efforts continue to rise. (See <i>Toolbox</i>, December 1990/January 1991).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The archetype is most helpful when it is used well in advance of any problems, to see how the cumulative effects of continued success might lead to future problems.</li> <li>• Use the archetype to explore questions such as What kinds of pressures are building up in the organization as a result of the growth?</li> <li>• Look for ways to relieve pressures or remove limits before an organizational gasket blows.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Shifting the Burden/Addiction</b></p> 	<p>In a “Shifting the Burden,” a problem is “solved” by applying a symptomatic solution (B1) which diverts attention away from more fundamental solutions (R1). (See <i>Toolbox</i>, September 1990). In an “Addiction” structure, a “Shifting the Burden” degrades into an addictive pattern in which the side-effect gets so entrenched that it overwhelms the original problem symptom. (See <i>Toolbox</i>, April 1992.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problem symptoms are usually easier than the other elements of the structure.</li> <li>• If the side-effect has become the problem, you may be dealing with an “Addiction” structure.</li> <li>• Whether a solution is “symptomatic” or “fundamental” often depends on one’s perspective. Explore the problem from differing perspective in order to come to a more comprehensive understanding of what the fundamental solution may be.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Success to the Successful</b></p> 	<p>In a “Success to the Successful” archetype, if one person or group (A) is given more resources, it has a higher likelihood of succeeding than B (assuming they are equally capable). The initial success justifies devoting more resources, its success diminishes, further justifying more resource allocations to A (R2). See <i>Toolbox</i>, March 1992.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Look for reasons why the system was set up to create just one “winner.”</li> <li>• Chop off one half of the archetype by focusing efforts and resources on one group, rather than creating a “winner-take-all” competition.</li> <li>• Find ways to make teams collaborators rather than competitors.</li> <li>• Identify goals or objectives that define success at a level higher than the individual players A and B.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Tragedy of the Commons</b></p> 	<p>In “Tragedy of the Commons” structure, each person pursues actions which are individually beneficial (R1 and R2). If the amount of activity grows too large for the system to support, however, the “commons” becomes experiences diminishing benefits (B1 and B2). (See <i>Toolbox</i>, August 1991.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effective solutions for “Tragedy of the Commons” scenario never lie at the individual level.</li> <li>• Ask questions such as: “What are the incentives for individuals to persist in their actions?” “Can the long-term collective loss be made more real and immediate to the individual actors?”</li> <li>• Find ways to reconcile short-term cumulative consequences. A governing body that is chartered with the sustainability of the resources limit can help.</li> </ul>

ARCHETYPE	DESCRIPTION	GUIDELINES
<p><b>Drifting Goals</b></p> 	<p>In a “Drifting Goals” archetype, a gap between the goal and current reality can be resolved by taking corrective action (B1) or lowering the goal (B2). The critical difference is that lowering the goal immediately closes the gap, whereas corrective actions usually take time. (See <i>Toolbox</i>, October 1990).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drifting performance figures are usually indicators that the “Drifting Goals” archetype is at work and that real corrective actions are not being taken.</li> <li>• A critical aspect of avoiding a potential “Drifting Goals” scenario is to determine what drives the setting of the goals.</li> <li>• Goals located outside the system will be less susceptible to drifting goals pressures.</li> </ul>
<p><b>Escalation</b></p>	<p>In the “Escalation” archetype, one party (A) takes actions that are perceived by the other as a threat. The other party (B) responds in a similar manner, increasing the threat to A and resulting in more threatening actions by A. The reinforcing loop is traced out by following the outline of the figure-8 produced by the two balancing loops. (See <i>Toolbox</i>, November 1991.)</p>	<p>To break an escalation structure, ask the following questions:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• What is the relative measure that pits one party against the other and can you change it?</li> <li>• What are the significant delays in the system that may distort the true nature of the threat?</li> <li>• What are the deep-rooted assumptions that lie beneath the actions taken in response to the threat?</li> </ul>
<p><b>Fixes That Fail</b></p>	<p>In a “Fixes That Fail” situation, a problem symptom cries out for resolution. A solution is quickly implemented that alleviates the symptom (B1), but the unintended consequences of the “fix” exacerbate the problem (R1). Over time (right), the problem symptom returns to its previous level or becomes worse. (See <i>Toolbox</i>, November 1990).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Breaking a “Fixes that Fail” cycle usually requires acknowledging that the fix is merely alleviating a symptom, and making a commitment to solve the real problem now.</li> <li>• A two-pronged attack of applying solution will help ensure that you don’t get caught in a perpetual cycle of solving yesterday’s “solutions.”</li> </ul>
<p><b>Growth and Underinvestment</b></p>	<p>In a “Growth and Underinvestment” archetype, growth approaches a limit that can be eliminated or pushed into the future if capacity investments are made. Instead, performance standards are lowered to justify underinvestment, leading to lower performance which further justifies underinvestment. (See <i>Toolbox</i>, June/July 1992.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dig into the assumptions which drive capacity investment decisions. If past performance dominates as a consideration, try to balance that perspective with a fresh look at demand and the factors that drive its growth.</li> <li>• If there is potential for growth, build capacity in anticipation of future demand.</li> </ul>

## Modélisation et quantification (étape 14)

La modélisation en dynamique des systèmes est un aboutissement pour un modélisateur. D’une part, elle offre une vision systémique d’un problème. Elle oblige à prendre en compte les interactions, les rétroactions et les retards temporels, plutôt que de regarder les variables isolément. D’autre part, elle porte sur la compréhension des comportements dynamiques. Elle permet de voir comment des boucles renforçantes et équilibrantes produisent des trajectoires (croissance, oscillations, effondrement...). Ensuite, elle constitue une aide à la décision. Il s’agit de tester différents scénarios de politiques ou d’actions dans un environnement “sûr”, avant d’agir dans le réel. En outre, elle s’apparente à un apprentissage collectif. Les

diagrammes (boucles causales, stocks-flux) sont très utiles en ateliers participatifs pour créer une compréhension partagée. Enfin, elle renvoie à une exploration de long terme. Elle révèle des effets différés ou contre-intuitifs qui échappent aux approches linéaires classiques.

La modélisation appelle à la quantification, et donc à la constitution d'une base de données. Cette quantification présente à la fois des avantages et des inconvénients.

Parmi les avantages, précisons que la quantification (i) permet de simuler des scénarios chiffrés et de voir l'évolution dans le temps (à quel moment l'adoption de la voiture électrique pèsera sur les émissions de GES ?) ; (ii) met en évidence des seuils et des dynamiques non linéaires qu'on ne voit pas dans un schéma simple ; (iii) sert de support de négociations et d'argumentations avec des décideurs qui demandent souvent des chiffres ; (iv) permet de tester la sensibilité du système (quelles hypothèse comptent le plus ?).

Parmi les inconvénients, soulignons que la quantification (i) devient difficile lorsque les données sont manquantes ou incertaines (dès lors la quantification peut donner l'illusion de précision alors que les hypothèses sont fragiles) ; (ii) génère une complexité accrue (un modèle quantitatif peut devenir lourd, difficile à expliquer et à maintenir) ; (iii) produit de la rigidité (trop se focaliser sur les nombres peut faire prendre de vue la compréhension qualitative – les boucles et les relations causales) ; (iv) entraîne un risque de perte de confiance si les résultats chiffrés ne correspondent pas à l'expérience intuitive des acteurs.

Il est coutume de rappeler qu'en dynamique des systèmes, la modélisation et la quantification interviennent à la suite du diagramme des boucles causales (CLD) et d'un diagramme stocks flux (SFD)<sup>23</sup>. Ce rappel met l'accent sur les pratiques de nombreux modélisateurs qui partent directement du diagramme stocks flux pour conceptualiser leur modèle. Une fois l'architecture du modèle conçue, l'acte de modélisation s'apparente à des éléments de routine (actualisation des données, modification de paramètres, multiplication de tests de sensibilité...). En proposant ces 16 étapes, nous réitérons nos conseils de réaliser un CLD, puis un SFD avant tout acte de modélisation. Les quatre points suivants précisent ce choix.

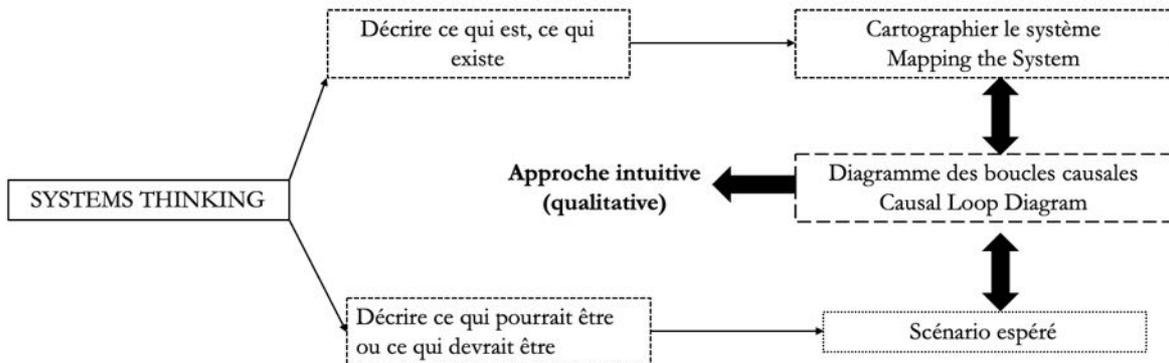
- Premièrement, le fait de *penser systèmes* (Systems Thinking) décrit le fonctionnement du monde tel qu'il est (la qualité d'un modèle dépend de la qualité du raisonnement, Richmond, 2001) mais nous permet également d'imaginer comment le monde pourrait être. Le diagramme des boucles causales (CLD) décrit toutes les causalités supposées existées entre les différentes variables d'un système (Diemer, 2020). L'accent est mis sur les interrelations. Le CLD propose de définir qualitativement le modèle (grâce à un jeu d'hypothèses qui devront être confirmées par la suite). Il est donc nécessaire de décrire deux CLD - le CLD observé et le CLD espéré - en sachant que le CLD espéré

---

<sup>23</sup> Le logiciel Stella permet de partir du SFD pour concevoir un CLD (fonction rarement utilisée par des modélisateurs quantitatifs).

intègre à la fois les points leviers (susceptible d'apporter des réponses à la problématique posée) et les points de bascule (il s'agit d'actionner les leviers du changement).

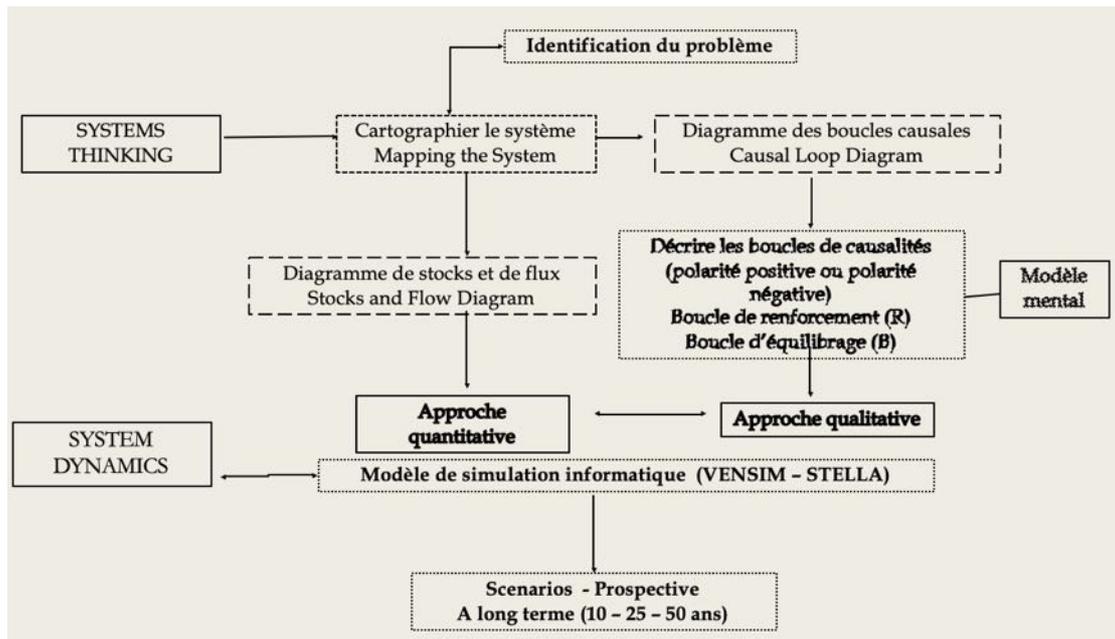
Figure 42 : Systems Thinking



Source : Diemer (2020, 2019, 2012)

- Deuxièmement, la pensée systémique est une méthode permettant de cartographier un système complexe, elle constitue également la première étape mentale dans le design d'un modèle. L'étape suivante vise à quantifier le modèle afin de faire des simulations (Braunschweig, 1985). C'est ce qui constitue le passage de « *Systems Thinking* » à « *System Dynamics* ». La dynamique des systèmes (popularisée par Forrester) - via les diagrammes de boucles causales et les diagrammes de stocks - est l'étude des systèmes de rétroaction dynamique à l'aide de la simulation informatique (Bala & al., 2017). Elle s'applique aux problèmes dynamiques survenant dans des systèmes sociaux, de gestion, économiques (Radzicki, 2011) ou écologiques complexes - littéralement tout système dynamique est caractérisé par l'interdépendance, l'interaction mutuelle, la rétroaction d'informations et la causalité circulaire. Le concept de rétroaction est au cœur de l'approche de la dynamique des systèmes. Les diagrammes de boucles de rétroaction sont des outils permettant de conceptualiser la structure d'un système complexe et de communiquer des informations basées sur des modèles (il s'agit également de prendre en compte les délais temporels des boucles de rétroactions). La méthodologie de la dynamique des systèmes implique la dominance et la non-linéarité des boucles, le concept de changement endogène, une structure de système (limites du système, boucles de rétroaction, niveaux et taux, objectif, état observé, écart, action souhaitée), des stocks (niveaux) et des flux (taux) en tant que composantes essentielles de la structure du système, et le comportement en tant que conséquence de la structure. Le passage à la dynamique des systèmes permet d'intégrer les approches qualitative et quantitative du modèle, qui via la simulation informatique, permettent de faire des simulations à long terme (10 - 25 - 50 - 100 ans). Ce dernier point est crucial, le modèle ne donne pas de prévisions mais des évolutions de tendance sur le long terme. A ce titre, il constitue un bon outil d'aide à la décision. La dynamique des systèmes est une technique de modélisation qui permet de comprendre et d'analyser des problèmes complexes (Sterman, 2000).

Figure 43 : Modélisation et simulation



Source : Diemer (2020, 2019, 2012, 2004)

Le passage du diagramme stocks – flux (SFD) à la modélisation quantitative est ici primordial. Ce passage formalise implicitement quatre étapes :

- (1) le diagramme qualitatif (identification des stocks ou plus précisément des variables d'état qui s'accumulent, des flux via ce qui entre et ce qui sort, et des rétroactions) ;
- (2) la traduction des relations en équations (chaque stock est représenté par une équation différentielle intégrée sur le temps, chaque flux est formulé comme une fonction des variables, les délais et les non linéarités sont explicités) ;
- (3) le paramétrage donne les valeurs initiales, des contraintes et des fonctions ;
- (4) la simulation numérique (avec un pas de temps pour calculer l'évolution des stocks et des flux sur le temps, la réalisation de courbes.

Troisièmement, le quantitatif n'est pas synonyme de mesurable. Pour effectuer une analyse quantitative plus détaillée, il faut nécessairement partir du SFD. Un diagramme de boucles causales (CLD) doit être transformé en un diagramme de stock et de flux (SDF). C'est l'étape qui permet de créer le modèle, d'étudier et d'analyser le système de manière quantitative (un stock est le terme désignant toute entité qui s'accumule ou s'épuise au fil du temps, un flux est le taux de variation d'un stock).

Quatrièmement, si la modélisation et la quantification sont une fin en soi, il convient de rappeler que les modèles sont avant tout utiles (mais très souvent faux ou biaisés). Les modélisateurs devront chercher à répondre à plusieurs questions : dans quelles circonstances leur modèle ne fonctionne pas ? Quelles sont les limites de leur confiance dans l'utilité de ce modèle ? Où se situent les principaux leviers ?

## Simulation, calibrage et validation (étape 15)

A la question, est-ce que les modèles de simulation sont d'une réelle utilité, il n'est pas inutile de rappeler que toute décision repose sur un modèle, une simulation, un calibrage et une validation (Ruth, Hannon, 1997).

- **Le modèle** précise que nos représentations sont basées à la fois sur des images, des relations, des abstractions de la vie réelle. Notre perception de la réalité est un modèle en soi. Ce sont nos observations et notre expérience de la modélisation (en tant que pratique quotidienne) qui nous permettent de projeter une image mentale de ce qui se présente à nous. Si le modèle mental est bien la base sur laquelle se forme toute décision (étape 1), le modèle de simulation rend le modèle plus explicite car il peut être communiqué à toute la communauté scientifique : « *A system dynamics model is more carefully structured in accordance with dynamic principles, so it better relates underlying assumptions to system behavior. A system dynamics model can be simulated on a computer, so, unlike a mental model. Its behavioral implications can be determined precisely* » (Forrester, 1976, p. 55).

- **La simulation** est la seule manière de tester un modèle - notamment ses hypothèses (Milstein, Homer, 2006) et d'évaluer ses effets en matière de politique (économique). Selon Sterman (2000), la complexité des modèles mentaux (étape 8) - leur niveau de détails - excédant notre capacité à comprendre toutes les implications des dits modèles, il ne peut y avoir d'autre échappatoire que dans la simulation : « *without simulation, even the best conceptual models can only be tested and improved by relying on the learning feedback through the real world. As we have seen, this feedback is very slow and often rendered ineffective by dynamic complexity, time delays, inadequate and ambiguous feedback, poor reasoning skills, defensive reactions, and the cost of experimentation* » (2000, p. 37).

Dans le cas de modèles de comportement (humain), certains n'hésitent pas à rappeler toute la difficulté de l'exercice : « *Behavior is a difficult subject matter, not because it is inaccessible, but because it is extremely complex. Since it is a process, rather than a thing, it cannot easily be held still for observation* » (Skinner, 1965, p. 15). C'est cependant sous-estimer les régularités présentes dans la prise de décisions. L'étape 6 (Structure et comportements) et l'étape 13 (Archétypes) sont là pour rappeler l'existence de telles régularités et donc, faire de la simulation l'un des atouts de la dynamique des systèmes.

Concrètement, la simulation désigne le processus par lequel on fait évaluer un système modélisé dans le temps à l'aide d'équations mathématiques (généralement des différentielles) afin d'observer son comportement sous certaines conditions initiales (technique, économique, sociale, environnementale, politique...). Simuler, c'est donc faire « tourner » un modèle pour voir comment les variables qui composent sa structure, évoluent au fil du temps (Cavana & al., 2021) en fonction du principe d'accumulation (flux, stocks), des boucles de rétroaction (positives et négatives), des délais temporels, des effets de non-linéarité...

Dans le cas des logiciels Vensim ou Stella, la simulation impose d'aller modifier les « settings » pour fixer le pas temporel (jour, semaine, mois, année...), de partir du diagramme stock - flux, de définir les équations (pad mathématique) illustrant les boucles de rétroaction (positives ou négatives), de calculer l'évolution de chaque variable, et d'observer le comportement du système sur une période donnée (on fait de la prospective plutôt que de la prévision).

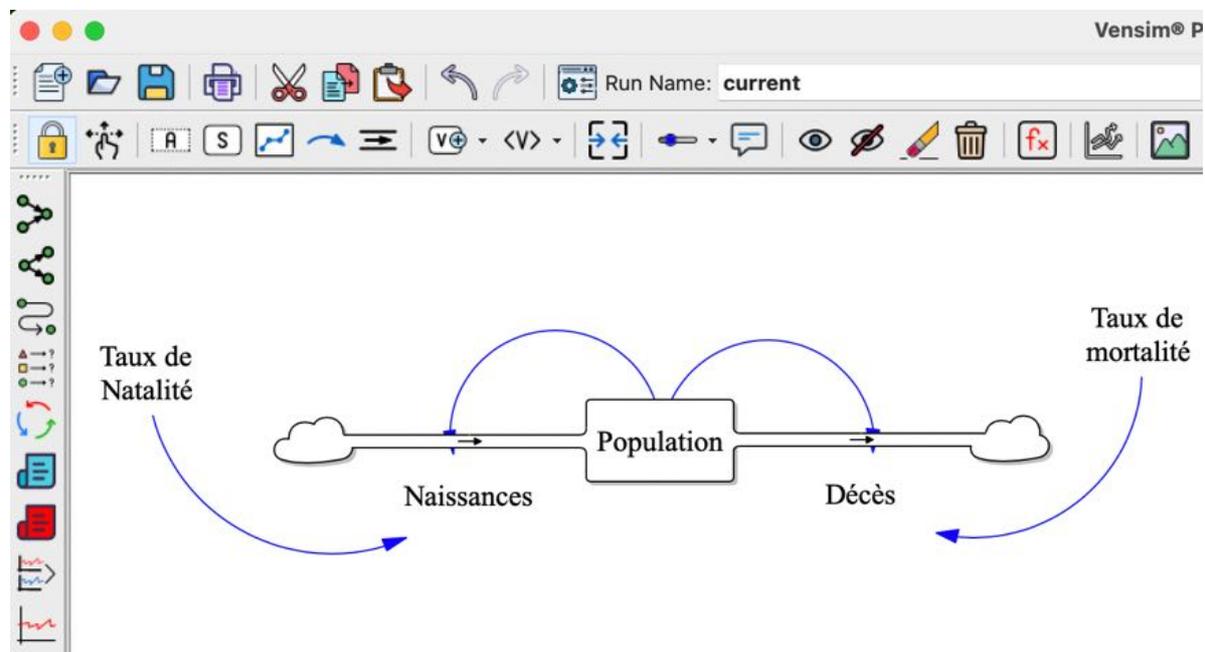
Exemple : Prenons notre modèle stocks - flux de la population.

Stocks = Population

Flux entrant : Naissances

Flux sortant : Décès

En simulant ce modèle, on pourra observer comment la population évoluera dans les 50 prochaines années, selon différents scénarios (étape 16) : baisse du taux de natalité, introduction des allocations familiales, désir d'enfant des ménages... La simulation permet de tester les scénarios alternatifs, d'étudier les effets non linéaires et les dynamiques de long terme (étape 5) et de repérer les effets de seuil, de retard (étape 4) ou des oscillations que l'intuition (via le modèle mental ne révèle pas).



### Structure du modèle

Stocks : Population

Flux entrant : naissances

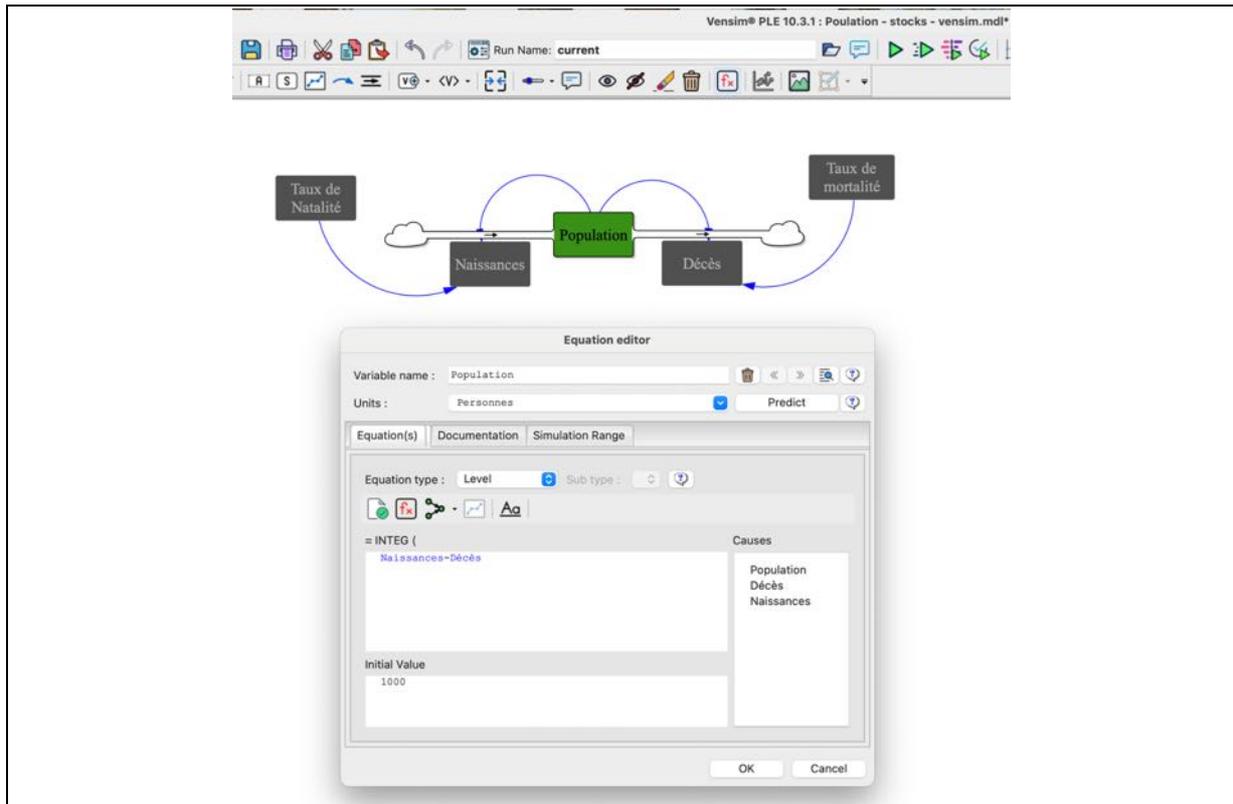
Flux sortant : décès

Equations : naissances = taux de natalité x population

Décès = taux de mortalité x population

Variation de la population = naissances - décès

Population en t+1 = Population en t + variation de la population x pas temporel

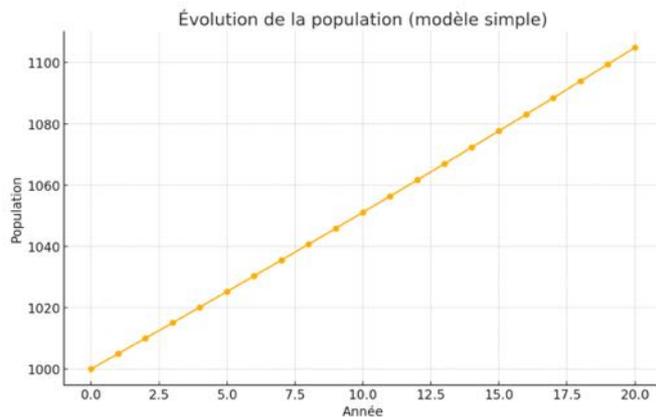


Hypothèses du modèle

- Population initiale = 1 000
- Taux de natalité = 2 %/an
- Taux de mortalité = 1,5 %/an
- Pas de temps = 1 an
- Durée de simulation = 20 ans

Simulation du modèle<sup>24</sup>

Année	Population
0	1 000
1	1 005
2	1 010,03
3	1 015,08
...	...
20	~1 105



La population augmente lentement chaque année car le taux de natalité dépasse légèrement le taux de mortalité. Cette **croissance exponentielle douce** est typique d’une boucle de rétroaction **positive (auto-renforçante)**.

<sup>24</sup> Il est également possible pour les besoins de l’exercice de compléter la simulation du modèle stock flux par un modèle codé Python.

Mais la simulation n'est pas le seul problème posé au modélisateur, le calibrage et la validation du modèle sont également des étapes intermédiaires importantes.

- Le calibrage d'un modèle en dynamique des systèmes consiste à ajuster les valeurs des paramètres du modèle afin qu'il reproduise fidèlement le comportement observé d'un système réel.



On peut ici identifier 5 étapes dans le calibrage d'un modèle :

- (1) *Collecte des données empiriques* : données historiques (séries temporelles sur la population, la consommation, la production...) et sources (statistiques officielles, enquêtes, rapports scientifiques, données d'entreprises ou de collectivités publiques...)
- (2) *Le choix des paramètres à calibrer* : il s'agit d'identifier les paramètres critiques (taux de croissance, délais, coefficient d'influence, propensions, élasticités...), certains paramètres peuvent être fixés à des valeurs connues, d'autres devront être estimés. Le paramétrage peut différer selon le contexte (culturel, institutionnel, historique, démographique, économique, environnemental...).
- (3) *La formulation des critères d'ajustement* : Pour quantifier globalement cet ajustement, on utilise le plus souvent le critère dit "des moindres carrés". Ce critère, issu de la Statistique, consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées expérimentalement et celles calculées par le modèle. Il s'agit d'un problème de minimisation pour lequel on dispose d'algorithmes efficaces lorsque les relations utilisées dans le modèle sont linéaires. La distance entre les données simulées et les données observées peut être appréhendée par l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), le coefficient de corrélation (R2) et parfois pondérée selon l'importance des variables ou de la période.
- (4) *La méthode d'optimisation* : Elle peut être manuelle (ajustement progressif des paramètres) ou automatique (algorithmes d'optimisation : régression non linéaire, algorithmes génétiques, algorithmes d'évolution différentielle, méthodes bayésiennes telles que MCM, le machine learning tel que Random Forest, ANN...). Lorsque les relations étudiées ne sont pas linéaires, des algorithmes itératifs ou des approches plus spécifiques doivent être utilisés. Dans le cas des modèles de dynamique des systèmes, c'est le grand nombre de boucles de rétroaction (renforcement/régulation) qui engendre un processus de calibration itératif.

(5) *La validation croisée* : Il s'agit ici de tester le modèle sur un jeu de données différent de celui utilisé pour le calibrage, de vérifier la robustesse du modèle à travers des scénarios variés, de valider le modèle par une approche participative (généralement avec des parties prenantes d'un projet), on parle alors de *Participatory System Dynamics Modeling*.

Les logiciels Vensim, Stella, Anylogic, Insight Maker ou Powersim peuvent être utilisés. On peut également passer par un codage Python (Scipy Optimize, Imfit, emcee...) ou encore Matlab/R (avec des outils statistiques ou d'apprentissage).

Encadré 1 : Calibrage d'un modèle simplifié

Prenons un modèle simplifié, évolution d'un stock de population avec un taux de croissance naturel  
*Critère* : minimiser la différence entre les données simulées et les séries de l'INSEE sur la population de 1990 à 2020.

**Équation du modèle :**

$$P_{t+1} = P_t + r \cdot P_t$$

$P_t$  : population à l'année  $t$

$r$  : taux de croissance (paramètre à calibrer)

*Données empiriques observées*

Année	Population observée $P_t^{obs}$
0	1000
1	1050
2	1100
3	1160
4	1220

*But du calibrage* : Trouver la valeur de  $r$  qui minimise l'écart entre les valeurs simulées  $P_t$  (sim) et les valeurs observées  $P_t$  (obs)

*Formule d'erreur à minimiser* : utilisons l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

$$RMSE(r) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (P_t^{sim}(r) - P_t^{obs})^2}$$

$P_t^{sim}(r)$  est calculé à partir du modèle dynamique

$P_0 = 1000$ , valeur initiale connue

*Simulation (test des valeurs de  $r$ )*

Testons  $r = 0.05$  (5%)

- $P_0 = 1000$
- $P_1 = 1000 + 0.05 \times 1000 = 1050$
- $P_2 = 1050 + 0.05 \times 1050 = 1102.5$
- $P_3 = 1102.5 + 0.05 \times 1102.5 = 1157.625$
- $P_4 = 1157.625 + 0.05 \times 1157.625 \approx 1215.51$

*Comparons aux observations*

Année	Obs. $P_t^{obs}$	Sim. $P_t^{sim}$	Erreur <sup>2</sup>
1	1050	1050.00	0
2	1100	1102.50	6.25
3	1160	1157.63	5.60
4	1220	1215.51	20.14

*Conclusion*

Le calibrage consiste à tester différentes valeurs de  $r$  pour minimiser le RMSE. Une optimisation numérique peut être utilisée pour automatiser ce processus (ex : méthode du gradient, recherche dichotomique, ou `scipy.optimize` en Python).

- **La validation** d'un modèle (en dynamique des systèmes) est une étape essentielle pour s'assurer que le modèle reflète correctement la réalité du système étudié. Cette validation ne consiste pas seulement à vérifier que le modèle fonctionne sans erreur, mais qu'il est *crédible, fiable et pertinent* pour l'usage auquel il est destiné. Ainsi, un modèle macroéconomique est structuré de manière à analyser des questions à moyen et long terme au niveau national et à fournir des informations pratiques en matière de politiques économiques. Plus précisément, le modèle fournit aux décideurs politiques et aux autres utilisateurs une estimation des conséquences à attendre des choix politiques actuels et alternatifs. Ces estimations ne doivent pas être considérées comme des prévisions exactes (aucun modèle ne peut prévoir avec précision les tendances de développement à long terme), mais comme des projections raisonnables et cohérentes, basées sur un ensemble d'hypothèses claires et bien fondées. En fait, les résultats du modèle comportent intrinsèquement un degré élevé d'incertitude : sur l'horizon temporel considéré dans la simulation, une grande variété de changements imprévisibles peut se produire, et un grand nombre de paramètres peuvent prendre des valeurs différentes de celles observées dans le passé. Le processus de validation d'un modèle est donc centré sur le renforcement des hypothèses sous-jacentes basées sur les données et informations actuellement disponibles, en mettant l'accent sur l'amélioration de sa capacité à fournir des informations sur les questions clés abordées.

La validation est intégrée au processus plus large de mise en œuvre du modèle, un modèle en dynamique des systèmes est valide s'il est structurellement correct, comportementalement réaliste, opérationnellement utile, et documenté de façon transparente.

→ *La validation structurelle* d'un modèle est composée de cinq parties principales : (i) une vérification qualitative de la structure : la structure du modèle est-elle cohérente avec les connaissances descriptives pertinentes du système ? Pour répondre à cette question, il convient de préciser les connaissances descriptives des secteurs avec lesquels nous travaillons, c'est-à-dire les principales hypothèses sur les secteurs et la littérature pertinente justifiant ces hypothèses. Le modèle lui-même (structure et

équations) peut être inspecté pour évaluer le degré de cohérence de la structure avec les hypothèses mentionnées. (ii) *les Conditions extrêmes* : Chaque équation a-t-elle un sens même lorsque ses entrées prennent des valeurs extrêmes ? - Le modèle est continuellement soumis à des tests de conditions extrêmes, via son application à une grande variété d'économies, de sociétés et de contextes environnementaux. (iii) *l'adéquation des limites (structure)* : les concepts importants pour traiter le problème sont-ils endogènes (étape 1) au modèle ? Pour cela, nous examinons le nombre d'indicateurs qui sont reproduits de manière endogène dans le modèle, et si nous pouvons lier la performance de ces indicateurs à des politiques qui se traduisent par des dépenses - dont l'analyse donne le coût de la réalisation des objectifs. Le modèle doit être en mesure de relier les indicateurs au coût de leur réalisation. Le modèle y parvient en reliant les politiques à des interventions chiffrées qui sont paramétrées par étalonnage à l'aide de données historiques et d'hypothèses examinées avec les autorités compétentes (par exemple, les dépenses de santé requises par habitant, le coût de l'infrastructure de transport par kilomètre, etc.), (iv) *la cohérence dimensionnelle* : Chaque équation est-elle cohérente d'un point de vue dimensionnel ? - Les unités utilisées pour chaque variable peuvent être vérifiées dans le modèle. Un contrôle de cohérence est automatiquement effectué par les logiciels Vensim ou Stella ; (v) *la vérification des paramètres* : les paramètres du modèle sont-ils cohérents avec les connaissances descriptives (et numériques, le cas échéant) du système ? - D'un point de vue pragmatique, nous pouvons vérifier les catégories de paramètres suivants : (1) les niveaux de référence des indicateurs - à établir conjointement avec les experts locaux ; (2) les paramètres décrivant les structures physiques, telles que la dynamique des nutriments dans le sol ou la dynamique de l'eau : sur la base de la littérature pertinente, chacun d'entre eux peut être vu dans le modèle et est ouvert à l'examen et à l'ajustement, si nécessaire ; (3) les paramètres pertinents pour le calcul des coûts, tels que les coûts unitaires de la construction d'infrastructures et le temps de construction - à établir conjointement avec les experts locaux ; (4) les paramètres qui sont établis sur la base du processus de calibrage.

Après avoir vérifié l'utilisation des paramètres, c'est-à-dire la vérification de la structure qualitative (par exemple, existe-t-il une relation entre l'accès aux routes et l'emploi, qui sera exprimée par un paramètre d'élasticité ?), la vérification des valeurs des paramètres est un processus itératif, qui fait partie du processus de rapport Business As Usual. Dans ce rapport, les combinaisons de paramètres et la mesure dans laquelle elles reproduisent les données historiques seront détaillées. Les paramètres peuvent ensuite être vérifiés sur la base des statistiques sommaires (évaluation quantitative), ainsi que de leurs tailles relatives (évaluation qualitative, par exemple en vérifiant l'impact relatif de la densité des infrastructures, de la dimension spatiale des zones d'emplois).

Sur le plan opérationnel, la validation structurelle d'un modèle en dynamique des systèmes pourra s'appuyer sur les 4 méthodes suivantes : (1) la revue de littérature par

des experts (il s'agit de confronter la structure du modèle - flux, stocks, boucles de rétroaction, équations - à la compréhension des experts), une démarche participative (*Participatory System Dynamics Modelling*) intégrant des professionnels du terrain et des citoyens peut également permettre de valider la cohérence et la pertinence du cadre structurel. (2) la justification des hypothèses (chaque équation, paramètre et structure doit avoir une base empirique ou théorique), (3) un test de dimensionnalité (vérifier que les unités sont cohérentes dans les équations), (4) l'analyse des boucles de rétroaction (identifier les boucles dominantes et préciser leur logique), (5)

Encadré 2 : Illustration d'une validation structurelle de la consommation des ménages

On souhaite ici modéliser la dynamique de la consommation des ménages (voir le diagramme des boucles de causalités de l'étape 7), en lien avec le revenu disponible, l'épargne, et les comportements de consommation. Les différentes étapes de la validation structurelle du modèle passent par :

- Avis de la littérature et/ou des experts et/ou des professionnels

On peut comparer la structure du modèle avec des modèles économiquement établis tels que le modèle IS-LM, un modèle post-keynésien... On peut interroger des chercheurs sur la pertinence de la structure du modèle

*Validation* : si la structure du modèle est en phase avec la littérature et l'avis des experts, alors cela renforce sa validité structurelle

- La justification des relations causales (hypothèses)

Les ménages consomment une partie fixe (c) de leur revenu disponible

Le revenu disponible dépend de l'emploi et des salaires

La consommation stimule la production via la demande

La production influence l'emploi

La consommation des ménages, c'est le revenu disponible multiplié par la propension marginale à consommer

*Validation* : cette relation suit la fonction de consommation keynésienne  $C = c Y$  où  $0 < c < 1$

La structure du modèle est théoriquement fondée (relation mathématique)

- Analyse des stocks et des flux (hypothèses)

Le stock peut être constitué de l'épargne en euros (si nous avons à intégrer le stock de monnaie détenue sur un compte bancaire alors l'épargne serait un flux)

Le revenu disponible et la consommation sont des flux entrants

Les dépenses exceptionnelles, les retraits... sont des flux sortants

*Validation* : le stock varie avec la dynamique du flux net (entrant, sortant), l'équation peut prendre la forme suivante et est conforme à la logique stock flux.

$$\text{Épargne}(t + 1) = \text{Épargne}(t) + (\text{Revenu} - \text{Consommation}) \cdot \Delta t$$

- Le test de dimensionnalité

Le revenu disponible est exprimé en € par mois, la propension marginale à consommer est un part du revenu qui est consommé (un pourcentage, pas de dimension), la consommation est exprimée en € par mois.

*Validation* : toutes les unités sont cohérentes

- La revue du diagramme des boucles de causalité (CLD)

Ainsi, la hausse du revenu disponible augmente la consommation des ménages, qui stimule la production, qui crée des emplois, distribue plus de revenus ...

*Validation* : cette boucle de rétroaction positive ® est réaliste, elle correspond à l'effet du multiplicateur keynésien, elle est donc structurellement justifiée économiquement.

→ *La validation comportementale* consiste à vérifier si le comportement simulé du modèle correspond au comportement observé du système réel. Cette validation peut amener à (i) une comparaison avec des données historiques (le modèle reproduit-il les tendances passées ?) ; (ii) à des tests de comportement extrême (comment le modèle réagit-il à des conditions limites ?) ; (iii) à l'analyse de la sensibilité (évaluer l'impact des paramètres clés sur les résultats) ; (iv) à des tests de robustesse (le comportement reste-t-il plausible face à des variations d'entrée ?).

Les tests les plus pertinents sont les résumés statistiques fournis pour les indicateurs du modèle, qui fournissent des chiffres pour l'évaluation quantitative du degré de reproduction des données historiques par le modèle. Les statistiques récapitulatives suivantes pourront être fournies : la population (nombre de points de données historiques), la couverture des données (% de points de simulation avec des points de données historiques correspondants), le R au carré, l'erreur moyenne absolue en pourcentage, l'erreur quadratique moyenne, le biais de Thiel, la variation de Thiel, la covariation de Thiel.

En raison de la finalité du modèle, l'objectif de la calibration est de reproduire les tendances à moyen et long terme des données, tout en accordant moins d'importance à la dynamique à court terme. L'erreur résiduelle issue du processus de calibrage est analysée et décomposée par composante à l'aide des statistiques de Theil en biais, variation inégale et covariation inégale. Cette analyse oriente la poursuite de l'étalonnage vers la réduction des erreurs des deux premiers types afin de saisir correctement les tendances à moyen et long terme des données, en accordant moins d'importance aux erreurs de nature non systématique, qui sont dues à l'incapacité du modèle à saisir les fluctuations à court terme. Pour l'adéquation de ces statistiques sommaires dans l'évaluation de la robustesse du comportement des modèles de dynamique des systèmes, on peut se référer aux travaux de Sterman (1984) et Oliva (2003).

→ *La validation opérationnelle ou pragmatique* cherche à évaluer si le modèle est utile pour les prises de décision et répond aux objectifs de modélisation. Il peut s'agir d'une validation par les utilisateurs finaux<sup>25</sup> (le modèle est-il compréhensible, pertinent et exploitable par les décideurs ?), d'une simulation de scénarios (les résultats du modèle aident-ils à choisir entre différentes options ?), de tests de plausibilité (les résultats semblent-ils réalistes pour des non-experts ?).

→ *La validation par la documentation* assure la transparence et la traçabilité du modèle, elle doit permettre à d'autres de le comprendre, le tester, voire le réutiliser. Certains éléments sont donc attendus : (i) la description claire et précise des hypothèses (étape 1), (ii) la documentation des données utilisées (application du process FAIR), (iii) la

---

<sup>25</sup> Lorsqu'un modèle s'adresse à des élus, ce mode de validation reste d'une importance capitale. Les modèles de dynamique des systèmes sont par essence transparents et peuvent être partagés dans la communauté scientifique, cependant du point de vue de l'utilisateur final, nous reprendrons un adage bien connu des modélisateurs – *the models stays into the box*.

référence aux sources (littérature, données empiriques, applications...) et (iv) un journal de validation dans lequel le modélisateur va récapituler dans le temps, les étapes de construction du modèle, les méthodes utilisées, les résultats des tests, les analyses de ce qui a marché et de ce qui n'a pas marché, les pistes d'amélioration du modèle...).

## Scenarios, feuille de route (étape 16)

Un scénario est une expérience virtuelle qui consiste à modifier **certaines** hypothèses, politiques ou paramètres d'un modèle afin d'en observer les conséquences sur le comportement du système. Il ne s'agit ni de prédictions, ni de vérités absolues, ce sont des hypothèses conditionnelles (« *Si on fait ça, alors il se passera cela* »). En dynamique des systèmes, un scénario est une projection simulée du comportement d'un système sur une période donnée, construite à partir de paramètres spécifiques, d'hypothèses et de décisions stratégiques. C'est un outil central pour explorer l'avenir, tester des politiques alternatives, ou comprendre les impacts de changements dans l'environnement ou le système lui-même. Les scénarios au pluriel s'inscrivent ainsi dans une démarche méthodologique qui consiste à :

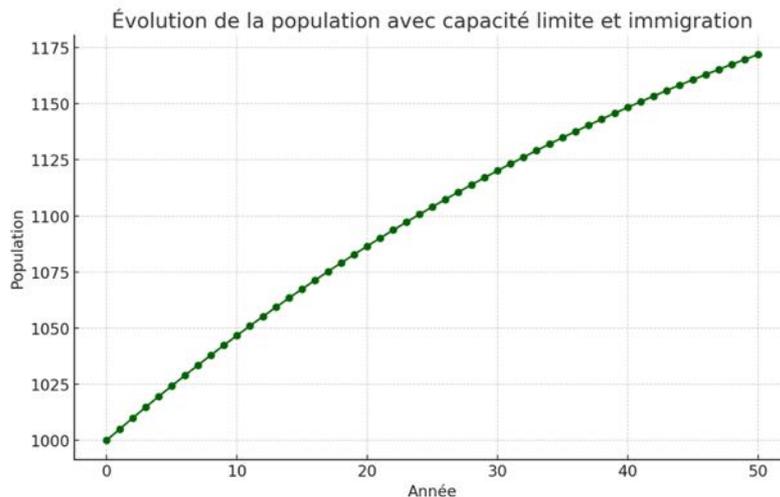
- (i) définir un scénario de référence (on parle de scénario tendanciel ou scénario de base) qui correspond au comportement du système tel qu'il est actuellement (sans changement). Ce scénario, qualifié par certains de Business as Usual (BAU) sert de point de comparaison pour les autres scénarios ;
- (ii) proposer des scénarios alternatifs qui permettront de tester des interventions (en lien avec l'étape 10 des points leviers). Dans un modèle économique, on peut chercher à augmenter le taux d'épargne des ménages, à baisser leur niveau de consommation (décroissance), à introduire un taxe carbone (macroéconomie écologique), à subventionner une technologie ou l'usage d'un produit (vélo électrique) ;
- (iii) évaluer la résilience du système face à des événements extrêmes ou improbables (crise financière, brutale hausse des prix, catastrophes naturelles, effondrement d'un marché...), la présence de scénarios de stress (exemple des crashes tests réalisés par les banques centrales) ou extrêmes permet d'anticiper et de se préparer à réagir à des situations particulières ;
- (iv) à modifier un paramètre à la fois (ou plusieurs) pour voir son impact sur les résultats du modèle, le scénario s'apparente à une analyse de sensibilité (on peut faire varier le taux d'épargne entre 0.16 et 0.25, la propension marginale à consommer entre 0.6 et 0.9, le taux d'utilisation des capacités de production entre 0.65 et 0.85 ou encore la durée de vie d'un produit entre 5 et 15 ans) ;
- (v) à croiser plusieurs hypothèses pour créer des futurs contrastés. Souvent utilisé dans la planification stratégique, cette méthode vise à analyser des scénarios combinés. Une matrice croisée permet ainsi de différencier les scénarios proposés en fonction du

contexte (stable, instable), des hypothèses retenues et du niveau d'actions (engagement fort ou faible).

*Encadré 4 : Scénario du modèle de population avec des ressources limitées*

Si nous repartons de notre modèle simplifié de population (population, naissances, décès), il est possible de tester un scénario intégrant une contrainte sur les ressources utilisées. On peut également conceptualiser un scénario intégrant plusieurs hypothèses :

- Une capacité limite (ressources limitées),
- Une baisse du taux de natalité à mesure que la population s'approche de cette limite,
- Une hausse du taux de mortalité si la population dépasse la capacité,
- Une immigration constante.



*Interprétation du scénario* : La population **croît rapidement au début**, puis sa croissance **ralentit** en approchant la capacité limite. Le système tend vers un **équilibre dynamique** autour de la capacité maximale (ici 2 000), influencé par les flux entrants et les ajustements internes. Il est possible d'ajouter des chocs externes (pandémie, crise alimentaire...) ou d'intégrer des politiques publiques (contrôle des naissances, limitation de l'immigration...) dans le modèle.

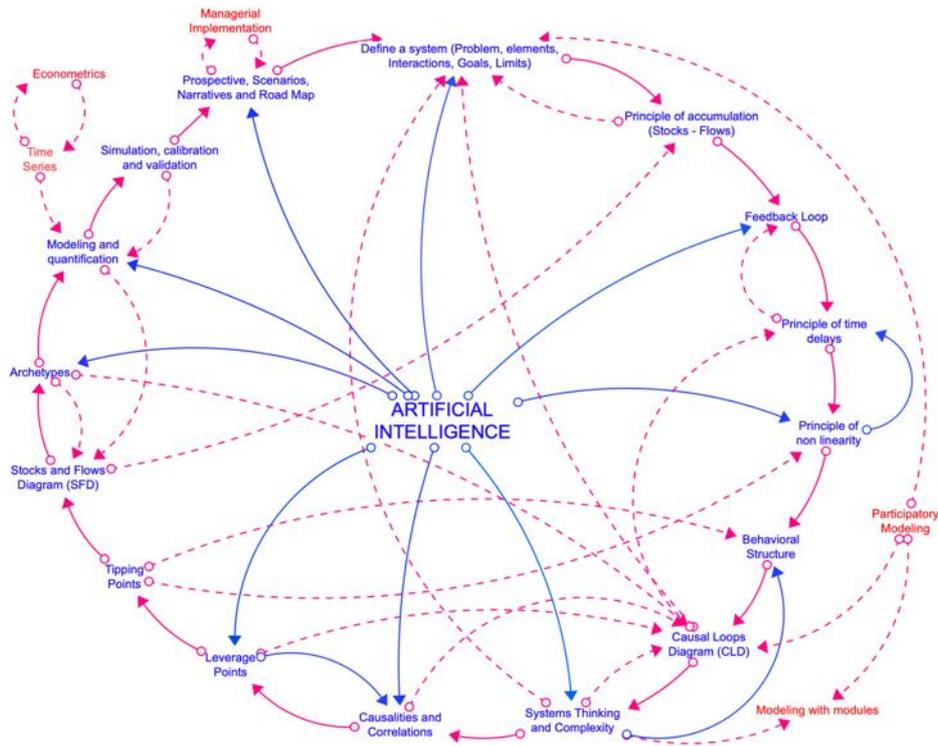
## Conclusion

A la fin des années 80, Flood, Jackson et Keys ont identifié les quatre branches à l'origine de la recherche sur les systèmes : la théorie générale des systèmes, la science des systèmes, la cybernétique et les approches en termes de systèmes : *"For the proper theorising of the relationship between the tendencies that make up the systems movement is certainly one of the most important challenges that the systems community faces in the decade to come. Its future growth and prosperity as a unified body of scholars and practitioners, and the realisation of its potential for massively increased influence in the affairs of organisations and societies, crucially depend upon the resolution of this problem"* (1988, p. 1). La recherche sur les systèmes trouve ainsi ses origines dans les travaux de Ludwig Von Bertalanffy (*General System Theory*, 1968), de Norbert Wiener (*Cybernetics Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, 1948), de Jay Forrester (*Industrial Dynamics*, 1961 ; *Principles of Systems*, 1968 ; *Urban Dynamics*, 1969) et bien d'autres.

Les travaux de J.J Forrester et de Richmond font figure de pionniers en matière de dynamique des systèmes. C'est à travers leurs principaux résultats que nous avons proposé une analyse en 16 étapes de la dynamique des systèmes : définition du système (éléments, interactions, objectifs et limites) ; principe d'accumulation (stocks - flux) ; boucles de rétroaction ; principe des effets retard et des délais ; principe de non linéarité ; relation structure - comportement ; diagramme des boucles causales ; penser global et complexité ; causalités et corrélations ; points leviers ; points de basculement ; diagramme stocks flux ; archétypes ; modélisation et quantification ; simulation, calibrage et validation, prospective, scénarios, narratives et feuilles de route. Cette nouvelle approche doit nous permettre (1) d'établir un pont entre la conceptualisation de la pensée systémique et la modélisation dynamique d'un système, et surtout (2) de diffuser la dynamique des systèmes dans le cadre éducatif français (au lycée comme à l'université). Si la dynamique des systèmes permet de résoudre des problèmes complexes, elle doit également relever plusieurs défis :

1° intégrer l'intelligence artificielle dans son cadre méthodologique. En effet, l'intelligence artificielle (IA) et la dynamique des systèmes (DS) peuvent se renforcer mutuellement. Dans un modèle de DS, il faut souvent estimer des taux, des coefficients ou des délais... Ces paramètres sont difficiles à obtenir directement. Les techniques de Machine Learning (régression, réseaux de neurones, optimisation bayésienne) peuvent analyser les grandes bases de données et calibrer automatiquement les paramètres du modèle (on peut citer l'ajustement d'un modèle de diffusion des voitures électriques via les données réelles d'immatriculation).

Figure 44 : L'IA au coeur de la dynamique des systèmes



Source : L'auteur

2° Si les modèles en dynamique des systèmes ont la prétention de s'appuyer sur les boucles de rétroaction et l'approche stocks - flux pour aborder des problèmes complexes, ils souffrent encore d'une absence de prise en compte des stratégies des acteurs. Le couplage dynamique des systèmes, modèles d'agents (Agent Based Models) ou/et théorie des jeux, peut se révéler être très pertinent lorsqu'il s'agit de relier des modèles de comportements quantitatifs aux stratégies des acteurs.

3° La question de la prospective (et plus largement celle des scénarios et des narratives) doit constituer à elle-seule, une nouvelle étape dans la démarche méthodologique. Tous les travaux se rapportant à penser notre futur (Scénario Planning de Wack, Prospective de Godet...), à produire de nouveaux outils (carte des acteurs, carte des controverses) et à utiliser de nouvelles méthodologies (utilisation de l'intelligence artificielle) doivent enrichir nos pratiques de la dynamique des systèmes et les généraliser à l'ensemble des problèmes complexes.

La dynamique des systèmes peine encore à trouver sa place dans le milieu académique français et la boîte à outils des institutions nationales, il s'agit donc de redoubler d'efforts en matière de formation et de sensibilisation pour que chacun puisse s'approprier cette démarche, dès le plus jeune âge.

## Bibliographie

ARACIL J. (1984), *Introduction à la dynamique des systèmes*, Presses Universitaires de Lyon.

ARMSTRONG MCKAY D.I *et al.* (2022), Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, **377**. DOI: 10.1126/science.abn7950

BALA B.K, ARSHAD F.M, NOH K.M (2017), *System Dynamics, Modelling and Simulation*, Springer.

BRAUN W. (2002), *The system Archetypes*, <https://ctl.mit.edu/sites/ctl.mit.edu/files/attachments/tab%20c%20Pacheco%20-%20system%20archetypes.pdf>

BRAUNSCHWEIG B.L (1985), *La simulation sur micro-ordinateur, les modèles de la dynamique des systèmes*, Eyrolles.

CAVANA R.Y, DANGERFIELD B.C, PAVLOV O.V, RADZICKI M.J, WHEAT I.D (2021), *Feedback Economics*, Springer.

DONNADIEU G., KARSKY M. (1990), *The Dynamics of Behavior and Motivation*, Proceedings of the 1990 international System Dynamics Conference, Boston.

DONNADIEU G., KARSKY M. (1993), Les dynamiques de la motivation, *Revue internationale de Systémique*, vol 7, n°1.

DONNADIEU G., KARSKY M. (2002), *La systémique, penser et agir dans la complexité*, Editions Liaisons.

- COYLE R.G. (1989), *System Dynamics – The Next Ten Years*. In: Flood R.L., Jackson M.C., Keys P. (eds) *Systems Prospects*. Springer, Boston, MA.
- DIEMER A. (2020), Modéliser le COVID 19, défis et perspectives, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°15, Mars, p. 1 – 72.
- DIEMER A. (2012), *Les économistes et le développement durable*, Oeconomia.
- DIEMER A. (2004), Du rapport Limits to Growth à la dynamique des systèmes, *LAME Université Reims Champagne Ardenne, Document de travail*, n°02-2004, 24 février, p. 1 – 25.
- DIEMER A. (2000), *Discrimination inter-temporelle par les prix*, Thèse de doctorat, Paris Dauphine.
- DOYLE J.K, FORD D.N (1998), Mental Models Concepts for System Dynamics Research, *Systems Dynamics Review*, vol 14, n°1, p. 3 – 29.
- FORRESTER J.W (1992), Policies, decisions and information sources for modeling, *European Journal of Operational Research*, vol 59, p. 42 – 63.
- 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 (1968), *Principles of Systems*, Waltham, MA: Pegasus Communications. 391 p.
- FORRESTER J. W. (1961), *Industrial dynamics*. MIT Press.
- FORRESTER J. W. (1960), The impact of feedback control concepts on the management sciences (1975 republication of 1960 ‘FIER Distinguished Lecture’ delivered to the Foundation for Instrumentation Education and Research). *Collected papers of JW Forrester (1975 collection)* (p. 45-60). Wright-Allen Press.
- FORRESTER J. W. (1958), Industrial Dynamics - A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36(4), 37–66.
- FORRESTER J. W. (1956), Dynamic models of economic systems and industrial organizations (2003 republication of a ‘Note to the faculty research seminar. november 5, 1956’ and mit ‘D-memo’ zero) (19, pp. 331–345).

- GLADWELL M. (2000), *The Tipping Point: How Little Things Can Make a Big Difference*, Little, Brown and Company.
- GOUGH S. (1991), Thinking about Thinking, *Research Roundup*, vol 7, n°2 p. 2 – 5.
- GOODMAN M.R. (1974), *Study Notes in System Dynamics*, Productivity Press, Cambridge, MA.
- GOODMAN M. (1997), Systems Thinking, What, Why, When, and How ? *Systems Thinker*, vol 8, n°2, p. 6-7.
- HALPER, J., PEARL J. (2005), Causes and Explanations: A Structural-Model Approach. Part I: Causes, *Brit. J. Phil. Sci.* 56, p. 843–887.
- HALPER, J., PEARL J. (2005). Causes and Explanations: A Structural-Model Approach. Part II: Explanations, *Brit. J. Phil. Sci.* 56, p. 889–911.
- HARDIN G. (1968), « The Tragedy of the Commons », *Science*, vol. 162, n° 3859, p. 1243-1248.
- HURST W., WALKER H.K (1972), *The Problem Oriented System*, Medcom Press.
- IPCC (2021), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- JOHNSON-LAIRD P. (1994), Mental Models and Probabilistic Thinking, *Cognition*, vol 50, p. 189 – 209.
- JOHNSON-LAIRD P. (1993), *La théorie des modèles mentaux* in M.F Ehrlich, H. Tardieu, M. Cavazza (eds), *Les modèles mentaux, approche cognitive des représentations*, Masson, p. 1 – 20.
- JOHNSON-LAIRD P. (1980), Mental Models in Cognitive Science, *Cognitive Science*, vol 4, p. 71 – 115.
- KARSKY M. (2004), Dynamique des systèmes complexes : concepts et méthodologie, *Archives – Techniques de l'ingénieur*, 10 juillet, réf AG1565V1, p. 1-12.
- KARSKY M. (1991), La dynamique des systèmes en France, *Revue internationale de Systémique*, vol 5, n°2, p. 143 – 155.
- KARSKY M. (1991), What is to be done, *Revue internationale de Systémique*, vol 5, n°2, p. 109 – 177.
- KARSKY M., LORENTER A. (1980), Enriching the job content in the oil refinery : a Systems Dynamic Approach, IEEE conference on Systems and Cybernetics, Boston.
- KEYNES J.M (1936), *Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie*, Payot, traduction française (1942).
- KIM D. (2011), Using Causal Loop Diagrams to make mental models explicit, *The Systems Thinker*, vol 22, N°2, March, p. 6 – 8.
- KIM D., Lannon C.P (1997), *Applying Systems Archetypes*, Pegasus Communications.
- KIM D. (1992), Guidelines for Drawing Causal Loop Diagrams, *The Systems Thinker*, vol 3, n°1, p. 5 – 6.
- KIM D. (1992, 2000), *Systems Archetypes I : Diagnosing Systemic Issues and Designing High Leverage Interventions*, *Systems Archetypes II : Using Systems Archetypes to*

Take Effective Action, Systems Archetypes III : Understanding Patterns of Behavior and Delay. Pegasus Communications.

KLIR G.J (2013), *Architecture of Systems Problem Solving*, Springer Science, New York.

KRUGMAN P.R (1998), *La mondialisation n'est pas coupable, vertus et limites du libre - échange*, La découverte.

LANNON C. (2012), Causal Loop Construction : the basics, *Systems Thinker*, vol 23, n°8, October, p. 7-8.

LAURENCE M. (2022), Causal Loop Diagrams, A short Handbook, Cascade Institute, <https://cascadeinstitute.org/wp-content/uploads/2024/06/Causal-Loop-Diagrams-Handbook-June-27-2024.pdf>

LENTON T. M. et al. (2008). *Tipping elements in the Earth's climate system*, PNAS, 105(6) : 1786-1793.

LORENZ M.C (2009), The Problem Oriented Approach in M.D Lorenz, T. Mark Neer, P.L Demars (eds), *Small Animal Medical Diagnosis*, third Edition, Wiley Blackwell Editions.

LOVEJOY T.E, NOBRE C. (2018), Amazon Tipping Point : Last Chance for Action, *Science Advances*, vol 5, eaba2949, p. 1 - 2. <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.aba2949>

MEADOWS D. (2008), *Thinking in Systems*, Earthscan, London.

MEADOWS D. L. (1974). *Dynamics of Growth in a Finite World*. 637 p. Cambridge, MA.: Wright-Allen. [This is a generalization of the Malthusian principle (eventual scarcity induced by growth of population and demand) applicable to out time.]

MEADOWS D.L (1970), *The Dynamics of Commodity Production Cycles*, Cambridge Mass, Wright Allen Press.

MEADOWS D. H., MEADOWS D. L., RANDERS J., and BEHRENS W. W. III. (1992). *Beyond the Limits*. 300 pp. Post Mills, Vermont: Chelsea Green.

MESAROVIC M.D, YASUHIKO T. (1975), *General Systems Theory, Mathematical Foundations*, Academic Press Inc.

MESAROVIC M.D (1967), *General Systems Theory and its Mathematical Foundation*, Case Western Reserve University, Presentation at the 1967 Systems Science and Cybernetics Conference, IEEE, Boston, Massachusetts, october 11 - 13.

MILKOREIT M. & al. (2018), Defining tipping points for social – ecological systems scholarship – an interdisciplinary literature review, *Environmental Research Letters*, vol 13, p. 1 - 12. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaaa75/pdf>

MILSTEIN B., HOMER J. (2006), Background on System Dynamics Simulation Modeling, With a Summary of Major Public Health Studies, Syndemics Prevention Network, May 5th, p. 1 - 10. <http://www.cdc.gov/syndemics>

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.

- OULIARIS S. (2011), *Qu'est-ce que l'économétrie, comment quantifier une théorie ? Finance et Développement*, FMI, Décembre, p. 38 – 39.
- OSTROM E. (1990), *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action*, Cambridge, Cambridge University Press, coll. « The Political economy of institutions and decisions ».
- PAULRE B. (1985), *La causalité en économie*, Presses Universitaires de Lyon.
- PIEPER T., KLEIN S.B (2007), *The Bulleye : A Systems Approach to Modeling Family Firms*, *Family Business Review*, vol xx, n°4, December, p. 301 – 319.
- PRUYT E. (2013), *Small System Dynamics Models for Big Issues : Triple Jump towards Real-World Dynamics Complexity*, <http://simulation.tbm.tudelft.nl/smallSDmodels/Intro.html>
- PRUYT E. (2007, January). *Decision-Making and Dynamically Complex Multi-Dimensional Societal Issues: Combining System Dynamics and Multiple Criteria Decision Analysis to Explore the Energy-Climate Change Issue*. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Solvay Business School, Brussels.
- PRUYT E. (2004). *System dynamics models of electrical wind power potentiality*. In J. Coyle (Ed.), *Proceedings of the 22nd Conference of the System Dynamics Society*, Oxford.
- 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.
- ROBERTS N. (1983), *Introduction to Computer Simulation, A System Dynamics Modelling Approach*, Productivity.
- ROGERS E.M (1962) *Diffusion of Innovations*, The Free Press.
- RICHARDSON G.P (1991), *Feedback Thought in Social Science and Systems Theory*, Pegasus Communications.
- RICHARDSON G.P (1986), *Problems with Causal Loop Diagrams*, *System Dynamics Review*, Vol 2, issue 2, Summer, p. 158 – 170.
- RICHMOND B. (2001), *An Introduction to Systems Thinking*, STELLA, HPS.
- RICHMOND B. (1994), *System Dynamics/systems thinking, lets Just Get On With It*, *International System Dynamics Conference*, Sterling, Scotland.
- RICHMOND B. (1991), *Systems thinking, four key questions*, HPS – High Performance Systems, Inc.
- RUTH M., HANNON B. (1997), *Modelling Dynamic Economic Systems*, Springer.
- SCHAFFERNICHT M. (2007), *Causality and Diagrams for System Dynamics*, [https://www.researchgate.net/publication/228875210\\_Causality\\_and\\_diagrams\\_for\\_system\\_dynamics/references](https://www.researchgate.net/publication/228875210_Causality_and_diagrams_for_system_dynamics/references)
- SALINI P. (2017), *Introduction à la dynamique des systèmes*, L'Harmattan.

- SENGE P. (2015), *La cinquième discipline*, Eyrolles.
- SHINKLE G.A, SHARMA A., SHARRY P., TOBIAS J., CARTEL M., VERGIAWAN D. (2023), *Business Model Idea Screening : Advancing toward the Bullseye, Organizational Dynamics*, vol 52, 100995, p. 1 - 14.
- SKINNER B.F (1965), *Science and Human Behavior*, The Free Press.
- STEFFEN W. et al. (2018). *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*, PNAS, 115(33): 8252-8259.
- STERMAN J.D (2000), *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a complex world*, McGrawHill Education.
- STERMAN J.D (1992), *System Dynamics Modeling for Project Management*, Sloan School of Management, MIT, <https://web.mit.edu/jsterman/www/SDG/project.pdf>
- STERMAN J.D. (1989a), " Misperceptions of feedback in dynamic decision making" , *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 43/3, 301-335.
- STERMAN J.D. (1989b), " Modeling managerial behavior : Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment" , *Management Science* 35/3, 321-339.
- STERMAN J.D. (1989c), *The People Express Management Flight Simulator*, Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA.
- STERMAN J.D. (1986), " The economic long wave: Theory and evidence" , *System Dynamics Review*, 2/2, 87-125.
- STERMAN J.D. (1985), " A behavioral model of the economic long wave", *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol 6, 17-53.
- THIEL D. (1998), *La dynamique des systèmes*, Hermes.
- WARDMAN K.T (1994), *Anatomy of a Reinforcing Loop*, *The Systems Thinker*, February, p. 9.
- ZAGONEL A.A, CORBET T. (2006), *Levels of confidence in System Dynamics Modeling, A Pragmatic Approach to Assessment of Dynamic Models*, *24th Conference of the System Dynamics Society*, p. 1 - 19.