

# Une introduction à l'approche systémique

*Appréhender la complexité*

# Une introduction à l'approche systémique

*Appréhender la complexité*

**Certu**

centre d'Études sur les réseaux,  
les transports, l'urbanisme  
et les constructions publiques  
9, rue Juliette Récamier  
69456 Lyon Cedex 06  
téléphone: 04 72 74 58 00  
télécopie: 04 72 74 59 00  
[www.certu.fr](http://www.certu.fr)

## Avis aux lecteurs

La collection Rapports d'étude du Certu se compose de publications proposant des informations inédites, analysant et explorant de nouveaux champs d'investigation. Cependant l'évolution des idées est susceptible de remettre en cause le contenu de ces rapports.

Le Certu publie aussi les collections :

**Dossiers :** Ouvrages faisant le point sur un sujet précis assez limité, correspondant soit à une technique nouvelle, soit à un problème nouveau non traité dans la littérature courante. Le sujet de l'ouvrage s'adresse plutôt aux professionnels confirmés. Ils pourront y trouver des repères qui les aideront dans leur démarche. Mais le contenu présenté ne doit pas être considéré comme une recommandation à appliquer sans discernement, et des solutions différentes pourront être adoptées selon les circonstances.

**Références:** Cette collection comporte les guides techniques, les ouvrages méthodologiques et les autres ouvrages qui, sur un champ donné, présentent de manière pédagogique ce que le professionnel doit savoir. Le Certu a suivi une démarche de validation du contenu et atteste que celui-ci reflète l'état de l'art. Il recommande au professionnel de ne pas s'écarter des solutions préconisées dans le document sans avoir pris l'avis d'experts reconnus.

**Débats :** Publications recueillant des contributions d'experts d'origines diverses, autour d'un thème spécifique. Les contributions présentées n'engagent que leurs auteurs.

Catalogue des publications disponible sur : <http://www.certu.fr>

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Organisme commanditaire :</b><br>Certu – Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme<br>et les constructions publiques<br>9, rue Juliette Récamier – 69456 LYON Cedex 06<br>Tél: 04 72 74 58 00 – Fax : 04 72 74 59 10<br>mailto:webmaster.certu@equipement.gouv.fr ; http://www.certu.fr/   |   |   |
| <b>Titre : Une introduction à l'approche systémique</b>  |   |   |
| <b>Sous-titre :</b><br>Appréhender la complexité   | <b>Date d'achèvement :</b><br>Février 2007                | <b>Langue :</b><br>Français   |
| <b>Commanditaires :</b><br>Frédéric Lasfargues<br>(Ex-Certu)<br>Christophe Dalin (Certu)   | <b>Rédactrice :</b><br>Aurore Cambien<br>(Certu/ URB-Our) | <b>Relecteurs assurance qualité :</b><br>Dalin Christophe<br>Frédéric Lasfargues<br>Jean Charles Castel<br>Nicolas Vernay<br>(Partie philosophique) |
| <b>Résumé</b><br><p>Depuis les années 30 s'est développé un courant de pensée dit systémique né de la prise de conscience de la complexité. L'ambition des pères de cette pensée était de mettre au point des méthodologies permettant de surmonter les difficultés rencontrées dans la tentative d'appréhension des problèmes complexes par les outils analytiques existants. Parmi les disciplines nées de ce courant, la dynamique des systèmes, inventée par Jay Forrester, propose une technique de formalisation et de modélisation des concepts systémiques. La dynamique des systèmes a connu son heure de gloire dans les années 70, notamment grâce aux modèles de dynamique urbaine et du monde.</p> <p>Ce rapport d'étude constitue une introduction à l'histoire et aux concepts de la systémique et de la dynamique des systèmes, et propose une première réflexion sur la place de la modélisation systémique dans le champ de la recherche en général et de la recherche urbaine en particulier.</p> |   |   |
| <b>Thème et sous thème :</b> Urbanisme et habitat/connaissance des territoires   |   |   |
| <b>Mots Clés :</b> analyse, architecture des systèmes, culture urbaine, décision publique, démarche systémique, diagnostic de territoire, dynamique des systèmes, étude urbaine, indicateur, modélisation, observation urbaine, pluridisciplinaire, transdisciplinarité  |   |   |
| <b>Diffusion :</b> Libre   |   |   |
| <b>Nombre de pages :</b> 84  | <b>Confidentialité :</b> Non                              | <b>Bibliographie :</b> Oui  |

## Avant-propos

Ce rapport d'étude est le fruit d'un travail que l'on pourrait qualifier de fin d'études que j'ai réalisé au cours de l'année 2006 alors que je suivais une quatrième année de spécialisation dans le domaine de la dynamique des systèmes. Parallèlement à mon apprentissage des *techniques* systémiques, j'ai été invitée à conduire ce travail de mise en perspective historico-épistémologique de la *Science des systèmes*.

La nécessité d'une clarification des distinctions qu'il convient d'opérer entre la pensée et les disciplines qui en sont issues et l'opportunité ainsi offerte de proposer une introduction à ces concepts aux agents du Certu et d'autres services du Ministère, alors invités à développer de telles démarches, ont abouti à la formalisation de mes quelques recherches sous la forme de ce mémoire et à la présentation de celles-ci à l'occasion d'une conférence débat donnée le 20 juin dernier au sein du Certu.

# Sommaire

## Préambule

|   |          |
|---|----------|
| <b>De la nécessité à dissiper les confusions.....</b> | <b>7</b> |
|---|----------|

|  |          |
|--|----------|
| <b>1. La systémique – fondements épistémologiques.....</b> | <b>9</b> |
|--|----------|

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1.1. Considérations historiques..... | 9 |
|--------------------------------------|---|

|  |    |
|--|----|
| 1.2. Des approches systémiques – de l'opérationalité de la systémique..... | 17 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| 1.3. Une approche systémique de la ville..... | 32 |
|---|----|

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2. La dynamique des systèmes<br/>ou la systémique de l'ingénieur.....</b> | <b>37</b> |
|--|-----------|

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 2.1. Naissance et développement..... | 37 |
|--------------------------------------|----|

|  |    |
|--|----|
| 2.2. Les concepts fondamentaux de la dynamique des systèmes..... | 39 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| 2.3. Processus de modélisation dynamique..... | 46 |
|---|----|

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 2.4. Quelques modèles classiques..... | 50 |
|---------------------------------------|----|

|   |    |
|---|----|
| 2.5. La ville comme système complexe objet de la dynamique des systèmes ..... | 55 |
|---|----|

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. État des lieux et perspectives d'avenir.....</b> | <b>71</b> |
|--|-----------|

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Approche systémique et dynamique des systèmes..... | 71 |
|---|----|

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.2. Recherche et pratique..... | 73 |
|---------------------------------|----|

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| <b>Conclusion.....</b> | <b>77</b> |
|------------------------|-----------|

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>Bibliographie.....</b> | <b>79</b> |
|---------------------------|-----------|

---



## Préambule

### De la nécessité de dissiper les confusions

Systémique, systèmes, dynamique des systèmes, analyse systémique, systématique, cybernétique, synergétique, complexe, compliqué, système dynamique, etc. Autant de termes qui appartiennent au même champ sémantique, qui renvoient plus ou moins directement à la systémique en général, mais qui recouvrent des réalités très différentes. Il règne une telle confusion autour de ces notions: bien souvent, un mot est utilisé pour un autre, le même mot, à l'inverse, est employé pour désigner des notions très différentes, la systémique est confondue avec les méthodes et outils qui se sont développés avec elle, et l'imprécision systématique qui entoure l'usage du vocabulaire dans ce domaine contribue à perpétuer la confusion ambiante autour de la notion de systémique.

Ce climat de confusion, qu'accompagne et que nourrit un usage inflationniste de la notion – d'aucun se réfère à des termes qu'il croit renvoyer à la même chose tout en ne sachant pas très bien de quoi il parle vraiment – pose problème dans la mesure où il induit un certain nombre de comportements et de réactions contradictoires et problématiques. Ce flou persistant tend à troubler le débat, provoquant des réactions sinon de rejet, au moins de méfiance, ou au contraire, suscitant des réactions d'engouement extrême, aussi irrationnelles qu'infondées. Ainsi, l'utilisation systématique et souvent incongrue de notions supposées relatives à la systémique déclenche immédiatement un réflexe d'objection chez les uns, persuadés, sans pourtant s'être réellement penché sur la question, du caractère éphémère d'une notion en quelque sorte à la mode, ou sceptiques quant à l'apport effectif en terme de connaissances de cette approche par rapport à d'autres. Les autres tombent dans le travers inverse qui consiste à considérer la systémique comme le remède à tous les maux, la réponse méthodologique et même, idéologique à tous les problèmes qu'ils rencontrent. Au delà de ces deux attitudes antithétiques, sinon dans leur extrémité, apparaît la nécessité d'explorer et de dessiner plus nettement les contours d'une voie de réflexion apaisée et affranchie des a priori qui existent autour de la pensée systémique. En d'autres termes, tout l'enjeu ici consiste à tenter de répondre à la question de savoir ce qu'est la systémique et peut être surtout, ce qu'elle n'est pas.

Par ailleurs, le caractère inflationniste de l'usage des concepts relatifs à la systémique semble relativement récent, de même que l'engouement pour cette approche. Ainsi le Ministère de l'Équipement affiche-t-il depuis peu la volonté d'une formation « systémique » de ses agents. Faut-il en conclure à la jeunesse de la théorie ou à celle de sa reconnaissance dans le champ scientifique, en particulier en France? Le questionnement qui est soulevé ici est finalement plus globalement celui de l'histoire de la systémique. De toute façon, il est inconcevable de penser pouvoir éclairer le débat entre pro et anti systémique sans dépasser les querelles actuelles par l'analyse des fondements historico-épistémologiques de la pensée systémique.

Cet examen sera en outre l'occasion d'interroger la nature des compétences requises par les systémiciens. L'approche systémique, notoirement interdisciplinaire et transversale, est-elle l'oeuvre de spécialistes ou au contraire de généralistes? La tendance est au tout systémique, et nombreux sont ceux qui exhortent tout un chacun à penser systémique. Est-ce à dire alors que la systémique est si abordable que nous sommes tous appelés à l'appliquer? En fait, la question qui est sous-jacente ici est celle de la distinction qu'il convient d'opérer absolument entre la systémique dite de première génération qui pousse la démarche au dernier degré de modélisation quantitative et la systémique de deuxième génération ou « System Thinking » qui est une approche plus douce, et peut être, plus accessible. L'autre différence qu'il faut clairement établir est celle qui existe entre la systémique et les techniques diverses et variées qui se sont développées comme autant d'outils opérationnels destinés, eux, aux spécialistes. Et puis l'exhortation à penser systémique semble vouloir dire que la systémique est une façon de penser et qu'en cela,



elle s'autorise à tout penser. Pourtant, tout est-il vraiment systémique? En d'autres termes le champ d'application de la systémique est-il infini ou doit-on considérer qu'un certain nombre de conditions doivent être réunies pour que l'approche systémique présente un véritable intérêt?

Sans dénaturer la réponse que nous apporterons à cette question dans le corps de notre dossier, nous pouvons déjà affirmer que la naissance de la systémique est intrinsèquement liée à la prise de conscience de la complexité croissante du monde. Celle-ci va de pair avec la mise en question de la capacité de la pensée classique à offrir les moyens de la compréhension de cette complexité, et à plus forte raison, à légitimer l'action sur cette complexité dont l'appréhension pose problème. Face à ces questions, un certain nombre de chercheurs travaillent à l'élaboration d'une nouvelle science à même de pallier à cette déficience de théories de la complexité. Cette nouvelle science sera la systémique. L'un des grands apports des systémiciens, dans leur tentative de constitution d'une science des systèmes complexes, est l'intérêt porté aux systèmes sociaux, et en particulier parmi ceux-ci, à la ville. Les représentations systémiques de la ville ont eu un retentissement important dans le champ de la pensée urbaine, mais il semblerait que l'intérêt pour ce type d'approches se soit quelque peu affaibli. Se pourrait-il que l'approche systémique ait atteint ses limites sur l'urbain? L'approche systémique est-elle pertinente pour saisir la complexité de la ville? Notre réflexion sur les applications de l'approche systémique aux questions urbaines ne pourra faire l'impasse sur ces interrogations qui la sous-tendent de part en part.

La systémique, nous le verrons, est une pensée encore jeune, et elle est loin d'avoir dévoilé toutes ses potentialités. Toutefois, elle a déjà apporté beaucoup à la pensée scientifique. En ceci, il semble que l'on puisse s'autoriser à dresser un état des lieux de la systémique aujourd'hui en France, de même qu'il devient légitime de nous interroger sur les perspectives d'avenir de cette démarche.

Le plan que nous allons développer en conséquence découle de ces quelques réflexions préalables. La systémique comme courant de pensée et comme démarche intellectuelle sera l'objet de réflexion d'un premier chapitre qui s'attachera à esquisser les fondements historiques et philosophiques de la systémique, avant d'en présenter les méthodes de mise en oeuvre, et enfin elle tentera de définir ce que peut être une approche systémique de l'objet ville. Dans un second chapitre, il s'agira de réitérer la démarche à l'oeuvre dans la première partie qui lui est symétrique, mais en prenant non plus pour objet la systémique, mais la dynamique des systèmes. Une première occasion nous sera fournie d'insister sur la nécessaire distinction qu'il convient d'opérer entre ces deux entités. Enfin, dans un troisième et dernier chapitre, nous dresserons l'état des lieux de la systémique d'un côté, de la dynamique des systèmes de l'autre, avant de conclure sur leurs perspectives d'avenir.

# 1. La systémique – fondements épistémologiques

La naissance de la pensée systémique est intrinsèquement liée à l'émergence, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, d'une réflexion approfondie autour de la notion de **complexité**. La prise de conscience de la complexité du monde va de pair avec celle des insuffisances de la pensée dite **classique** à offrir les moyens nécessaires à l'appréhension, à la compréhension de la complexité d'une part, à l'action sur cette complexité d'autre part. Les limites de la pensée analytique confrontée à la complexité sont mises en évidence par les travaux d'un certain nombre de chercheurs dans des disciplines aussi variées que la biologie, les mathématiques ou la neurophysiologie, considérés comme étant à l'origine du développement de la pensée systémique.

Le développement de la pensée systémique, dont les fondements épistémologiques feront l'objet d'une mise en perspective historique au cours de notre étude, accompagne celui d'un certain nombre de disciplines « systémiques », dont il se nourrit en même temps qu'il contribue à ce développement. Cette spécificité de l'essor de la systémique dans la seconde moitié du siècle passé éclaire la double nature de la **système** conçue à la fois comme un **courant de pensée**, un paradigme scientifique et comme une méthode, une **démarche intellectuelle**. En quelque sorte, la systémique telle qu'on l'entend aujourd'hui renvoie à la fois au cadre de pensée dans lesquelles s'inscrivent un certain nombre de disciplines, et à ces disciplines elles-mêmes.

Cette sorte de dualité de la systémique détermine la démarche mise en oeuvre dans les pages qui suivent: la mise en perspective épistémologique de la naissance de la systémique en tant que paradigme scientifique sera l'objet d'une première partie; dans un second temps, le caractère opérationnel de la systémique comme démarche de pensée sera explicitée à travers l'exploration d'un certain nombre de concepts communs à l'ensemble des disciplines pouvant être considérées comme « systémiques », c'est-à-dire ayant partie liée avec la systémique en tant que courant de pensée. Enfin, le moment sera venu d'appréhender la ville comme objet complexe susceptible de justifier une approche systémique.

## 1.1. Considérations historiques

L'entreprise consistant à tenter de saisir les raisons de l'essor de la pensée systémique comme nouveau paradigme scientifique ne saurait se contenter de la seule évocation de l'histoire de la systémique, de ses prémices à son épanouissement dans les années 70. En effet, dans l'évocation du développement de cette pensée, une large place doit être faite aux rapports qui opposent pensée positiviste et pensée systémique au cours de l'histoire des sciences. Celles-ci déterminent en effet le déroulement des événements intervenus au cours du demi-siècle dernier dans le champ des sciences. Il conviendra notamment de montrer comment le développement du positivisme, en produisant les conditions favorables au développement de la science dite classique, contribue par là même à préparer le terrain à sa propre remise en question, et par conséquent, à la naissance de la systémique.

### 1.1.1. Naissance et développement du paradigme positiviste

#### 1.1.1.1. De Platon et Aristote à Descartes et Newton

L'histoire de la philosophie grecque est marquée dès ses origines par une opposition qui n'aura de cesse d'alimenter des siècles durant de multiples débats. À la conception **platonicienne** du monde basée sur la théorie de l'idéation répond ainsi la conception **aristotélicienne** qui défend au contraire la primauté de l'expérience sensible comme moyen privilégié d'accès à la connais-

sance. Il semble qu'il faille remonter à cette querelle originelle pour comprendre les origines de l'avènement du positivisme comme épistémologie dominante de la rationalité moderne. Pour Platon, l'homme accède à la connaissance, aux réalités intelligibles, directement par la pensée. Le mythe de la caverne constitue une parabole devant précisément être entendue comme une mise en garde contre l'illusion des sens qui ne donnent à voir que les réalités sensibles, images imparfaites et trompeuses des réalités intelligibles, véritables connaissances auxquelles seule la raison ouvre l'accès. Contre cette conception de la connaissance, Aristote envisage pour sa part l'acte de connaître comme un dépassement de l'expérience sensible qui aboutirait, au delà de cette immédiate, mais nécessaire expérience, à la découverte de la réalité essentielle qu'elle dissimule. En d'autres termes, Aristote prône le recours à l'expérience sensible comme une étape nécessaire sur laquelle il s'agit d'appuyer sa réflexion, afin, par le recours à la logique, par abstraction, de donner naissance aux concepts et théories générales fondateurs d'une science universelle.

Notamment parce qu'il s'accordait parfaitement avec le discours chrétien qu'il a par ailleurs contribué à configurer sous l'influence de théologiens tels que Saint Augustin, le platonisme a dominé la pensée occidentale du premier millénaire. Mais au 12<sup>e</sup> siècle, la pensée d'Aristote fait l'objet d'un regain d'intérêt. Ce nouvel engouement doit beaucoup à la lecture chrétienne que Saint Thomas d'Acquin propose de l'oeuvre aristotélicienne. La **synthèse thomiste** est un grand moment d'équilibre entre raison et foi dans l'histoire des idées occidentale. Certes, la querelle dite des universaux vient assez rapidement remettre en question les théories thomistes. Mais, au delà de la mise en évidence des limites de cette pensée, et quelque opposées que soient les conclusions auxquelles les uns et les autres aboutissent, la querelle des universaux pose en réalité la question que soulèvent en creux les philosophies platonicienne, aristotélicienne ou thomiste et qui est celle des moyens de dépasser l'illusion des sens pour accéder à la connaissance.

La redécouverte d'Aristote est donc un grand moment dans l'histoire de la philosophie occidentale. Un des aspects de sa pensée aura notamment un impact considérable eu égard au développement de démarches fondatrices de la posture de la science moderne. L'acte de connaissance chez Aristote est en effet indissociable de l'observation, de l'expérience sensible qu'il s'agit d'éprouver et de remettre en question. Dans un contexte qui connaît à cette époque des bouleversements techniques et économiques dignes d'une petite révolution industrielle, l'aristotélisme en insistant sur le primat de l'observation et de l'expérience, donne un cadre de légitimité à des travaux de chercheurs dits « technologues. » Les méthodes inductives sont développées: les théories ainsi édifiées font l'objet de tests expérimentaux de vérification destinés à éprouver leur validité. On assiste à la **naissance de la science moderne**.

C'est dans le domaine de **l'astronomie** que cette démarche scientifique encore jeune va acquérir ses lettres de noblesse. Dès le XV<sup>e</sup> siècle, et surtout au cours des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles, les découvertes sont extraordinaires et tendent à justifier le recours à ces nouvelles méthodes qui s'appuient sur des techniques expérimentales et des appareils puissants et perfectionnés. Par ailleurs, ces découvertes contribuent à l'ébranlement des visions du monde alors en vigueur. Le monde dans lequel évoluent Copernic, Galilée ou encore Kepler connaît un véritable bouillonnement intellectuel, la profusion des idées et des références philosophiques témoigne des merveilles potentielles de la science à venir. Dans ce contexte parfois assourdissant, un homme élève sa voix plus claire que les autres pour énoncer son *Discours de la méthode*. **Descartes**, en 1637, inaugure définitivement la science aujourd'hui dite « classique » avec son oeuvre qui constitue véritablement l'acte de naissance de la rationalité scientifique.

*« La XVII<sup>e</sup> siècle va voir, en quelques décennies, la constitution d'une nouvelle conception du monde qui non seulement accompagnera la naissance de ce que nous appelons maintenant la mécanique classique, mais permettra l'essor de la science moderne dans sa conquête intellectuelle et technique d'une réalité **extérieure** à l'homme. »* [DONNADIEU, KARSKY : 2002]

Ce siècle est en effet marqué par deux grandes figures de la pensée scientifique moderne. Outre Descartes, précédemment évoqué, **Newton** joue un rôle primordial dans la constitution de cette nouvelle conception du monde qu'évoque Gérard Donnadiou, notamment en ce qu'il est le père

de la mécanique et de la physique classiques, qui s'épanouiront plus tard entre les mains de Laplace, Leibniz ou encore Maxwell. Par là, non seulement il poursuit l'oeuvre de bouleversement des mentalités entamée par l'astronomie, mais il inaugure également des méthodologies opérationnelles en accord avec les recommandations théoriques de Descartes quant à l'analyse et à la décomposition de toute réalité en ses éléments (ou composants « atomiques ») puis à la recomposition de la réalité dans sa globalité par sommation des connaissances acquises sur chacun des éléments pris séparément. Cette synthèse newtonienne témoigne implicitement d'une conception du monde unifiée où tous les éléments (y compris terrestre et céleste) seraient au même niveau ontologique.

Les bases de la pensée moderne sont donc jetées. La science jusque là abductive et inductive devient déductive.

### 1.1.1.2. Auguste Comte et l'avènement du paradigme positiviste

Si Descartes et Newton peuvent être considérés comme les pères de la pensée scientifique moderne, c'est à **Auguste Comte** que revient le mérite d'avoir véritablement constitué la pensée moderne comme paradigme scientifique connu sous le nom de **positivisme**.

La pensée d'Auguste Comte s'appuie sur sa théorie des **trois âges de l'humanité** qu'il convient d'évoquer ici ne serait-ce que brièvement dans la mesure où elle sous-tend de part en part son projet positiviste. Selon Auguste Comte, l'humanité aurait connu trois âges qui distinguent des conceptions du monde basées sur des interprétations très différentes des causes des phénomènes. Ainsi, l'*âge ou état théologique de l'humanité* correspond en quelque sorte à l'enfance de l'humanité. Les causes des phénomènes appellent des explications mystérieuses, qu'elles soient attribuées à des intentions des objets (fétichisme) ou à l'existence de forces surnaturelles ou d'un dieu. L'*âge métaphysique* ou âge de l'adolescence de la pensée voit les forces surnaturelles remplacées par des forces abstraites qui jouent le même rôle, mais qui sont de nature rationnelle, ne renvoyant plus à aucune religiosité. La nature, la matière ou encore la raison constituent autant d'exemples d'entités en soi sensées expliquer les phénomènes. Enfin, selon Auguste Comte, l'humanité connaît en son temps un nouvel âge ou état, l'*âge positif*, ou état viril de l'intelligence de l'homme. À ces explications, l'âge positiviste de l'humanité substitue des explications déterministes par les causes efficientes, explications formulées dans le langage de la logique, si possible des mathématiques. Le recours aux faits, à l'expérimentation, à l'épreuve de la réalité est ce qui permet de sortir des discours spéculatifs. C'est le premier principe du positivisme. Alors que l'esprit métaphysique recourt à des concepts éternels et universels, qu'elle ne soumet pas à la réalité, l'esprit positif lui confronte les hypothèses au monde réel.

Cette théorie permet de saisir les fondements de la démarche d'Auguste Comte. Celui-ci invente le mot de positivisme (qu'il reprend en réalité de Saint Simon) en 1848. Derrière ce mot se cache un projet ambitieux de philosophie des sciences fondé sur la classification des sciences, de la science de la matière aux sciences sociales en passant par les sciences de la vie. La théorie des trois âges s'applique à cette classification : certaines sciences auraient selon Auguste Comte atteint la plénitude de l'âge positif. C'est le cas par exemple des mathématiques et de la physique, alors que d'autres ne seraient encore qu'à l'âge métaphysique. Par ailleurs, les travaux d'Auguste Comte sont sous-tendus dès l'origine par une préoccupation prioritairement sociale. L'inventeur de la sociologie, conçue comme l'instrument de la construction d'une société parfaite, fondée sur la raison et sur l'harmonie, sera indéfectiblement habité par l'obsession de l'organisation de la société. L'on comprend mieux dès lors l'ambition qui est la sienne d'appliquer à tout le champ de la réalité, y compris aux objets sociaux, les méthodes d'analyse qui ont fait leur preuve dans les mathématiques. Dans le domaine social, par exemple, seule une observation bien conduite, assistée par une logique déductive s'appuyant sur le principe de causalité, permet d'atteindre une connaissance juste de l'objet conçu comme ensemble clos d'éléments matériels, séparé du sujet observant.

L'impact d'Auguste Comte est donc considérable eu égard à l'avènement du positivisme en tant que **paradigme scientifique**. Animée d'une préoccupation sociale vive, sa volonté de généralisation de la pensée inaugurée par Descartes et Newton dans des disciplines scientifiques déjà matures, à toute réalité, notamment à la réalité sociale, aboutit à une synthèse grandiose de la pensée scientifique moderne sous l'égide du positivisme.

L'influence du positivisme comtien, la force de ce paradigme au cours de ces derniers siècles est indéniable. Aujourd'hui encore, il constitue le cadre de pensée implicite de notre société où le schéma de causalité linéaire semble toujours fournir un outil dont la puissance est difficilement remise en question.

### 1.1.2. Contestations et mises en question des fondements du positivisme

#### 1.1.2.1. Quelques précurseurs

Le positivisme semble ainsi s'être imposé en tant que paradigme scientifique de manière relativement incontestée. Pourtant, il convient de nuancer une lecture par trop univoque qui tendrait à laisser penser par la suite que le courant systémique qui naît dès les années 30 – et qui fera l'objet d'un long développement ultérieurement – constitue une véritable rupture épistémologique par rapport au courant positiviste.

Avant même la mise en garde pascalienne qu'il convient souvent d'identifier comme un premier moment de contestation de la toute puissance de la raison, il semble plus juste de reconnaître dans l'histoire des idées divers éléments témoignant d'une conception du monde moins univoque qu'il n'y paraît. Ainsi chez les philosophes antiques nombres d'idées trouvent aujourd'hui une résonance toute particulière dans les concepts systémiques. Héraclite par exemple, philosophe pré socratique du VI<sup>e</sup> siècle avant Jésus Christ, considère que « *le combat est père de toute chose.* » La notion d'interaction est au cœur de sa philosophie. Selon lui, « *tout s'écoule.* » En d'autres termes, l'idée de flux, de temporalité et de dynamique est intrinsèque à la pensée qu'il développe du monde. Anaximan, autre philosophe du VII<sup>e</sup> siècle av. J.C., introduit dans sa pensée la notion d'infini en disant: « *il existe une pluralité de mondes qui tous connaissent la génération et la corruption.* » Au delà de la notion d'infini apparaît ici celle de cycle, que l'on retrouve chez les systémiciens. La richesse de la philosophie socratienne renferme également des concepts qui inspirent la pensée systémique. Ainsi la notion de questionnement ouvre des beaux jours à la réflexion systémique. La philosophie stoïcienne, avec sa notion de « *mélange pur* » évoque l'idée selon laquelle le tout est toujours plus, au sens de autre, que la somme des parties. L'importance des interactions d'une part et de but d'autre part, renvoient chez Platon à l'importance qu'il donne à la notion de finalité et le paradigme du tissage. Enfin, on trouve également chez Épicure des éléments qui tendent à montrer que l'histoire de la naissance de la pensée systémique n'est pas celle d'une rupture dans l'histoire des idées, mais qu'elle apparaît en réalité plus justement comme l'émergence et la synthèse d'éléments égrenés tout au long du chemin de la pensée depuis l'antiquité. Parmi ceux-ci, la réhabilitation de l'épreuve de la vérité par les sens ouvre la voie à la reconnaissance des valeurs de l'empirisme; l'idée qu'au fond de toute chose subsiste une part d'irrationnel pose l'impossibilité du réductionnisme absolu et la notion de *cyclamen* pose l'importance de la part du hasard, de l'aléa qui fondent plus tard la pensée systémique.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, certaines voix s'élèvent et font entendre ouvertement leurs réserves à l'égard de l'enthousiasme général qui anime la communauté scientifique. Ainsi, contemporain de Descartes, **Blaise Pascal**, qui par ailleurs salue les avancées vertigineuses connues notamment dans le domaine des mathématiques, émet des doutes quant à la toute puissance de la raison. Finalement, il semble peu surprenant que celui qui écrit en son temps que « *le cœur a ses raisons que la raison ignore* » adopte une position intellectuelle quelque peu en porte à faux par

rapport à la tendance au tout rationnel qui domine alors. Mathématicien de génie, Pascal sait combien la part rationnelle de l'esprit humain peut se révéler insuffisante sans la puissance inductive qui s'appuie sur **l'intuition**. En d'autres termes, si l'accès à la connaissance est impensable sans le recours à la raison, il n'en est pas moins illusoire de croire que l'intuition n'occupe pas une place primordiale dans les processus liés à l'acte de connaissance.. Au delà de cette première mise en garde quant à l'importance de l'intuition, Pascal va plus loin dans sa critique de la pensée positive naissante. Il insiste sur la part irréductible d'irrationnel qui non seulement anime l'esprit humain, mais conditionne d'une certaine manière les limites d'une connaissance qui ne serait basée que sur la seule capacité rationnelle de l'esprit humain. En d'autres termes, tout n'est pas rationalisable, en particulier par l'esprit humain. Cette conception apparaît comme paradoxale chez celui qui, en proposant son *pari* semblait vouloir convaincre l'homme de l'existence de Dieu en s'adressant directement à sa raison. En fait, Pascal n'est pas dupe, et c'est sans grande illusion qu'il appelle l'incroyant à la croyance. L'homme est pour Pascal tout autant esprit qu'« automate » et l'habitude chez lui a une force qu'il serait encore une fois hasardeux de sous estimer. Enfin, la troisième critique, la plus fondamentale selon nous, que l'on trouve chez Pascal à l'égard du positivisme naissant, est celle du réductionnisme analytique et de sa prétention à expliquer l'ensemble par ses éléments. À ce sujet, dans sa correspondance, une formule apparaît, au regard de l'évolution de la connaissance scientifique telle que nous pouvons l'objectiver aujourd'hui, comme visionnaire, d'une pertinence remarquable, contenant en germe le fondement même de la démarche systémique: « *Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiatees et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties.* »

Au XV<sup>e</sup>, **Léonard de Vinci**, entre autres, défend une position différente de celle de Pascal, mais qui partage avec celle-ci de ne pas s'inscrire sans réserve dans le courant de pensée dominant. La critique de Léonard de Vinci est celle de l'homme de l'art et de l'ingénieur, au sens d'inventeur, qui conteste la toute puissance de la rationalité. Il considère comme inconcevable une connaissance *détachée* de l'objet investi par l'action humaine. Le processus inventif, comme le processus *créatif*, échappe au principe analytique auquel il oppose le principe de **l'ingenium**<sup>1</sup>. Cette approche, contrairement à la démarche analytique, reconnaît et assume l'impossible séparation de l'objet étudié et du sujet connaissant. Ce faisant, elle nie l'existence d'une connaissance en soi, qui tirerait son objectivité précisément de la séparation entre l'objet et le sujet.

### 1.1.2.2. Le XX<sup>e</sup> siècle

La contestation latente qui accompagne dès sa naissance le développement du positivisme ne semble pourtant pas pouvoir infléchir – au moins dans l'immédiat – la direction que prend alors l'épistémologie dominante. Les progrès scientifiques et techniques que connaissent les XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles légitiment alors en effet les fondements de la **rationalité moderne** qui éprouve ses théories dans le réel et sort toujours plus puissante des succès qu'elle rencontre. Dans ce contexte ponctué de multiples triomphes, aucun esprit ne se hasarderait plus à la remettre en question. Il semble qu'à ce stade, rien ne puisse plus ébranler un système de pensée établi pour longtemps.

Pourtant, la remise en cause du paradigme positiviste va bientôt être réactivée par l'apparition d'un certain déséquilibre au sein du couple constitué par le progrès scientifique et la puissance du paradigme positiviste qui évoluaient jusqu'alors dans le même sens. La formation de failles dans l'édifice scientifique va contribuer à fragiliser l'épistémologie dominante à travers les rapports de quasi équivalence qui existent entre eux. Alors que durant des siècles le progrès scientifique légitimait et renforçait la rationalité analytique comme cadre de pensée, le **renouveau de la problématique scientifique** va produire les conditions du questionnement du paradigme positiviste.

<sup>1</sup> Faculté mentale caractérisée par sa capacité à relier, à conjoindre, à associer des choses séparées.

Le premier champs disciplinaire sur lequel la science se trouve mise en défaut est celui de la **Physique**. Si la théorie de la relativité est finalement assez facilement assimilée par le positivisme, il en est autrement de la **mécanique quantique** qui vient miner l'édifice de la physique newtonienne par l'infiniment petit. Comme l'explique Donnadiou dans son ouvrage précédemment cité, « *pour rendre compte des caractéristiques des particules élémentaires, à la fois ondes et corpuscules, la mécanique quantique qui se développe à partir de 1920 va devoir rompre avec le déterminisme et l'unicité de représentation du phénomène, accepter comme un fait incontournable une dualité de nature au plus intime du réel tout en affirmant la complémentarité de ces aspects duels.* » [DONNADIEU, KARSKY : 2002] Par ailleurs, la prétendue objectivité du scientifique se trouve ébranlée comme en témoignent les célèbres relations d'incertitude d'Heisenberg : le sujet connaissant agit sur le réel et tient compte de cette action.

Dans le domaine des **Sciences Humaines**, la naissance de la **psychanalyse** assène un nouveau coup au positivisme. Avec la découverte de l'inconscient comme objet d'étude se pose de nouveau la question de la relation entre sujet connaissant et objet, dans la mesure où l'inconscient est ce qui structure le sujet qui se livre à l'étude de cet objet.

Enfin, dans le domaine des **Mathématiques**, les bouleversements sont également considérables. C'est par exemple l'époque où Boole conçoit l'algèbre logique. Plus tard verront le jour les théories mathématiques d'où sortiront l'informatique et les ordinateurs.

La critique moderne du positivisme, qui se développe parallèlement aux remises en question subies de l'intérieur par le positivisme, reprend dans une certaine mesure celle qui fut formulée avant elle par Pascal ou Léonard de Vinci. Par exemple, **Paul Valéry** reprend à son compte et actualise la pensée de Léonard de Vinci. Non seulement la séparation du sujet et de l'objet est illusoire, mais elle n'est pas souhaitable en ce qu'elle fait partie intégrante du processus complexe de connaissance, voire elle est la connaissance elle-même. La réflexion de **Gaston Bachelard** [BACHELARD : 1934] dans les années 30 s'inscrit dans la même conception de la connaissance. Le caractère inéluctable de l'interaction entre le sujet connaissant et l'objet témoigne de la nature profonde de la connaissance conçue comme un acte de construction, du questionnement initial à la réponse qu'il appelle. **Alexandre Koyré**, dans ses travaux d'épistémologie, [KOYRE : 1968] mettra un point d'honneur à dénoncer les égarements d'une science moderne qui évacue l'homme au nom d'une prétendue objectivité qui s'avère en définitive utopique. Pour **Teilhard de Chardin** [THEILARD DE CHARDIN : 1955], une science du Tout ne pouvait faire l'impasse sur la subjectivité humaine. **Jean Piaget** [PIAGET : 1937], qui jouera un rôle primordial dans le développement de la nouvelle épistémologie, pense lui aussi la spécificité de la relation entre sujet et objet. Ses travaux sur le développement de l'intelligence chez l'enfant le conduisent à l'élaboration d'une théorie de la connaissance qui offre la première place à cette interaction sujet/objet. Selon ses conclusions, la connaissance n'est pas d'abord résultat mais **processus** actif produisant ce résultat. Le sujet ne connaît pas de choses en soi, mais il connaît l'acte par lequel il entre en interaction avec les choses. Avec Piaget, on passe d'une **causalité linéaire** où l'objet connaît son objet à une **causalité circulaire** où sujet et objet se déterminent mutuellement. Les hypothèses de la systémique sont exprimées.

Nombre de ces critiques, inspirées elles-mêmes des contestations initiales exprimées dès la naissance de la pensée positiviste, sont au fondement du développement de la pensée systémique à partir des années 30/40. Néanmoins, il semble qu'il faille nuancer une analyse qui tendrait à inscrire la systémique en rupture par rapport à l'épistémologie alors dominante, et au contraire, il nous paraît fondamental d'insister sur la **complémentarité** de deux approches qui peuvent certes apparaître d'abord comme opposées, mais qui ont en commun l'ambition d'offrir à l'homme les moyens de mieux comprendre le monde qui l'entoure. Tout au long de ce dossier, nous reviendrons ponctuellement sur la nécessité de dépasser la contradiction apparente entre les approches systémique et positiviste.

### 1.1.3. Naissance et développement du paradigme systémique

L'histoire de la systémique, de sa naissance à son avènement comme courant de pensée se déroule tout au long de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. L'identification de deux temps au cours de cette genèse permet de mettre en évidence le parallèle qui existe entre le développement du positivisme et celui de la systémique. En effet, la systémique, comme le positivisme, émerge d'abord sous la forme d'une **nouvelle méthode** favorisée par des avancées dans le domaine des sciences, auxquelles elle contribue en retour. Au terme d'une certaine maturation à ce niveau que l'on qualifiera de « technique », la théorisation de ce qui caractérise cette nouvelle approche par les épistémologues permet à la systémique de s'imposer, au delà d'un ensemble de méthodologies, en tant que véritable paradigme.

#### 1.1.3.1. Des années 30 aux années 70

Durant trois décennies, le dialogue constructif entre différentes disciplines scientifiques donne naissance aux grands principes qui sont au fondement de l'approche systémique. Ce dialogue a lieu pour l'essentiel au sein du prestigieux **Massachusetts Institute of Technology (MIT) à Boston**. La circulation d'idées contribue au transfert de méthodes et de terminologies d'une discipline à l'autre. En trois bonds d'environ dix ans chacun, les travaux réalisés au sein du MIT vont conduire du développement de la **Cybernétique** à celui de la systémique. Ce parcours est caractérisé par de multiples aller retour entre machine, organisme et société.

Le point de départ est à situer dans l'amitié intellectuelle qui lie le mathématicien **Norbert Wiener**, professeur au MIT, et le neurophysiologiste **Arturo Rosenblueth**, chercheur à la Harvard Medical School. De petites équipes de chercheurs travaillent sous leur égide à l'étude des analogies pouvant exister entre le comportement des organismes vivants d'un côté et celui des servomécanismes de l'autre. Une expérience célèbre dans l'histoire de la systémique établit ainsi une analogie troublante entre une « maladie » qui, sous certaines conditions, touche les appareils de pointage automatique pour canon anti-aérien et une « maladie » consécutive de lésions du cervelet chez l'homme. Dans les deux cas, un phénomène oscillatoire vient perturber la stabilité du système. Cette analogie a permis de mettre en évidence l'existence de **boucles de rétroaction** dans les systèmes physiologiques et techniques. Les bases d'une nouvelle discipline, la cybernétique, sont posées.

Les idées de Wiener et de Rosenblueth suscitent l'intérêt de chercheurs et la recherche de similitudes entre disciplines apparemment très différentes se retrouve au centre des recherches dans des domaines aussi variées que l'économie, la sociologie, la psychiatrie ou encore l'anthropologie. Une série de dix séminaires est organisée entre 1946 et 1953 à la Josiah Macy Foundation. Sociologues, mathématiciens, biologistes ou encore anthropologues s'y côtoient, discutant cybernétique, complexité, système. Notons également que c'est au cours de cette seconde décennie que s'est développée la bionique, et que le biologiste von Bertalanffy fonde la société pour l'étude des systèmes généraux (*Society for General Systems Research*). Au milieu de ce bouillonnement d'idées se constituent les bases d'un **langage commun** qui deviendra celui de la systémique.

Dans les années 50, le perfectionnement des premiers ordinateurs va permettre d'aborder la complexité sous un angle neuf. L'un des plus rapides, le Wirlwind II fut construit au MIT en 1951 et utilise pour la première fois une mémoire magnétique ultra rapide pour l'époque inventée par **Jay Forrester**. À la tête du Lincoln laboratory, cet ingénieur est chargé par l'air force en 1952 de coordonner la mise au point d'un système d'alerte et de défense mettant en oeuvre radars et ordinateurs dans le but de détecter et d'empêcher toute attaque ennemie sur le territoire américain. Cette expérience dans le domaine de la défense du territoire exacerbe la conscience de Forrester de l'importance de l'approche systémique dans la compréhension et dans le contrôle d'organisations complexes faisant intervenir des hommes et des machines interconnectés en temps réel, c'est-à-dire capables de prendre des décisions vitales au fur et à mesure de l'arrivée



des informations. Cette connaissance acquise, Forrester va s'intéresser, au sein de la Sloan School of Management du MIT dans laquelle il enseigne à la fin des années 50, à l'organisation de l'entreprise conçue comme système complexe. En 1961, il crée la **dynamique industrielle**, discipline dont le but est de tenter de comprendre et de prévoir, par la simulation informatique, notamment, le comportement des entreprises appréhendées comme des systèmes cybernétiques. L'extension de ses travaux à l'objet ville puis au monde forme l'essentiel de ce qui fonde la **dynamique des systèmes**, nous y reviendrons.

### 1.1.3.2. Les années 70

À partir des années 70, sont réunies un certain nombre de conditions culturelles, scientifiques et institutionnelles qui vont permettre, à partir des différentes approches développées au cours des trois décennies précédentes, de voir se constituer la science des systèmes ou pensée systémique. Le passage de sciences développant des approches systémiques à la Systémique conçue comme épistémologie repose sur une inter fécondation des idées entre les différentes disciplines et sur le rôle déterminant d'un certain nombre de chercheurs américains et français. Ces deniers sont en effet conscients de la nécessité d'une **synthèse** à un niveau **théorique** de l'ensemble des lois qui semblent fonder la science des systèmes. Parmi eux, H. Simon, H. von Foerster, J. Forrester, E. Morin, I. Prigogine, H. Atlan, J.L. Le Moigne...

Le premier à s'être attelé à cette tâche est le biologiste **Ludwig Von Bertalanffy** qui, en 1968, à New York, rassemble ses différents travaux dans un ouvrage de synthèse intitulé *General System Theory*, traduit en français sous le titre *La théorie générale des systèmes*. Dans cet ouvrage qui fait la part belle aux systèmes biologiques, l'auteur définit un certain nombre de concepts tels que ceux de systèmes ouverts, d'homéostasie, d'équifinalité, etc. Le premier, il prône une **appréhension globale du système**, insistant sur l'importance de la compréhension des **relations** entre les différents éléments, et non, comme préconisé par la pensée classique une saisie analytique des éléments du système.

Approximativement à la même époque, **Herbert Simon** [SIMON : 1974] et **Kenneth Boulding** contribuent eux aussi à théoriser les principes développées dans le cadre de leurs travaux. La définition des concepts d'**arborescence** et de **niveaux d'organisation** constituent ainsi une première étape vers l'effort de construction d'une typologie des systèmes que Boulding propose selon huit niveaux. Du premier niveau correspondant aux objets statiques et simples de la physique et de la chimie jusqu'au dernier niveau de la socio-culture, le mouvement est celui d'une complexification croissante. La compréhension du système représenté par le huitième niveau suppose celle de tous les niveaux précédents.

Dans les années 70, la tentative de généralisation de ses différents travaux par Jay Forrester aboutit à la constitution d'une nouvelle discipline, la dynamique des systèmes. Sans entrer ici dans des détails qui fourniront la matière de propos à venir, il convient simplement de noter le rôle de Jay Forrester dans l'avènement de la systémique. Le caractère **opérationnel** de la dynamique des systèmes explique en grande partie le succès immédiat qu'elle connaît dans des domaines aussi variés que la biologie, l'environnement, ou la gestion. Par ailleurs, les difficultés auxquelles elle se heurte par la suite, notamment en terme de quantification et de modélisation, induit la différenciation de la systémique en deux courants. D'un côté, la **systémique de première génération**, en filiation directe de la cybernétique, s'appuie sur des méthodes quantitatives et sur l'outil informatique pour, au delà de la seule compréhension du système, tenter de prévoir son comportement. La **systémique de seconde génération**, appelée *System Thinking*, s'inscrit dans une perspective un peu différente par rapport à la démarche prospectiviste de la systémique de première génération. Il s'agit dans cette conception, de mettre l'accent sur l'intelligibilité du comportement du système. Son but est de concevoir des modèles qualitatifs, de facture topologique par exemple, qui permettent d'entrer dans *l'intelligence* du phénomène et, éventuellement, d'en orienter l'action.

Cette systémique de seconde génération a connu elle aussi un grand succès notamment au Mexique et, surtout, en France. **Jean-Louis Le Moigne**, professeur à l'université d'Aix-Marseille a particulièrement contribué, par l'animation du groupe MCX<sup>2</sup> par exemple, au développement et aux applications de la pensée systémique. Il convient de citer ici l'AFSCET<sup>3</sup>, Association Française de sciences des Systèmes Cybernétiques cognitifs et Techniques, qui travaille en groupes d'études pluridisciplinaires facilitant les échanges entre chercheurs et co-organisant tous les trois ans un congrès européen de systémique.

## 1.2. Des approches systémiques – de l'opérationalité de la systémique

Le développement de la systémique, tel que présenté dans les lignes qui précèdent, apparaît donc moins comme une rupture que comme un glissement d'un paradigme à un autre par rapport au positivisme dominant du 17<sup>e</sup> siècle au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. L'avènement du positivisme comme nouveau paradigme scientifique est le fruit d'un processus long et complexe qui, de la redécouverte d'Aristote au Moyen Age à Auguste Comte au XIX<sup>e</sup> siècle en passant par Descartes au XVIII<sup>e</sup> siècle, se lit comme la résultante des progrès de la science moderne et du succès de ses nouvelles méthodes, et du travail de synthèse et de théorisation au niveau épistémologique de la pensée à l'oeuvre au sein de la science elle-même. De même, la pensée systémique s'appuie dès ses origines sur le développement d'un certain nombre de nouvelles approches dans le domaine scientifique. Ce que l'on désigne sous le nom de systémique renvoie donc à la fois au courant de pensée ou paradigme dont l'histoire a fait l'objet d'une analyse succincte et à tout un ensemble de concepts et de méthodologies. Ceux-ci ont contribué au développement de la systémique comme paradigme et, en retour, la pensée systémique leur fournit un cadre de légitimité. Dans cette partie, il s'agit donc de nous intéresser plus spécifiquement à l'approche systémique comme **démarche opérationnelle**.

### 1.2.1. Complexité et systémique

La naissance de l'approche systémique a partie liée avec la prise de conscience, notamment au sein du champ scientifique, de la **complexité croissante** du monde qui nous entoure. Le phénomène de complexification du monde, théorisé notamment par **Atlan** [ATLAN : 1979] et Theilard de Chardin, s'accompagne de l'apparition de psychismes de plus en plus puissants en mesure d'appréhender la complexité de l'environnement dans lequel ils évoluent. En d'autres termes, plus le monde devient complexe et plus l'Homme tend à développer une conscience plus aigüe de cette complexité.

Depuis ses origines, ce que d'aucun nomme le cosmos a connu une évolution qui va dans le sens d'une complexification croissante. En effet, de l'atome au cerveau humain, puis aux sociétés et civilisations, le nombre d'éléments constitutifs et la richesse des relations et interactions augmente, et avec eux, la complexité des phénomènes en jeu. De systèmes simples tels que la particule élémentaire ou l'atome, on est passé à des systèmes très organisés comme le mammifère ou la société. Cette organisation laisse souvent apparaître une architecture interne à base de redondance. Cette caractéristique explique que dans un premier temps, l'organisation est synonyme de simplification. En effet, le phénomène de redondance induit une diminution de la variété; en quelque sorte, l'ordre répétitif fige l'objet. Dans un second temps, l'organisation devient génératrice de nouvelles possibilités relationnelles entre sous ensembles organisés. Dès lors, la tendance s'inverse et la complexification tend à augmenter. L'apparition de relations entre sous ensembles conduit à introduire la notion de niveaux d'organisation théorisée entre autres par

2 MCX : Modélisation de la complexité, BP 154, 13605 Aix-en-Provence Cedex 01

3 AFSCET : Association Française de Sciences des Systèmes Cybernétiques, Cognitifs et Techniques – Conseil d'État, Place du palais royal, 75100 PARIS. <http://www.afscet.asso.fr>

Jean-Louis Le Moigne. On dit que l'on a affaire à une organisation complexifiante. L'évolution du monde tel que nous le connaissons aujourd'hui est bien le résultat d'un tel processus. À *l'infiniment petit* et à *l'infiniment grand* de Pascal, il faudrait ajouter un **infiniment complexe** comme axe d'évolution du cosmos.

Dans sa quête perpétuelle d'une meilleure compréhension de l'environnement dans lequel il évolue, l'homme est amené à devoir trouver des réponses aux questions fondamentales qui sont appelées à devenir elles-mêmes de plus en plus complexes. Dans ces conditions, la nécessité de développer de nouveaux moyens de se saisir de cette réalité apparaît comme fondamentale, et le développement de la systémique comme évident. Pourtant, la constitution d'une science de la complexité passe d'abord par la tentative de **définition** de la complexité. Objets et situations complexes ont en commun un certain nombre de caractéristiques qu'il convient ici d'examiner. Un premier trait caractérisant la complexité tient au **flou** et à **l'imprécision** auxquels est confronté celui qui tente de déterminer la constitution, les dimensions et les frontières de l'objet complexe étudié. Cette première spécificité de la complexité permet de mettre en évidence la différence entre complexité et complication. Un objet ou une situation compliqué se laisse difficilement appréhendé, mais au terme d'un effort, aussi considérable soit-il, il est toujours possible de finir par en avoir une connaissance exhaustive, d'en comprendre la structure et les lois de fonctionnement. **Aléa et instabilité** sont les deux mots formant la deuxième particularité d'une situation complexe. Le **temps** joue ainsi un rôle fondamental dans l'évolution de la complexité qui apparaît comme un mélange instable d'ordre et de désordre. **L'ambiguïté**, liée à l'existence au sein d'une situation complexe de logiques antagonistes pourtant nécessaires constitue la troisième caractéristique d'une situation complexe. Enfin, la sensibilité des systèmes complexes à la moindre modification des contraintes extérieures rend bien souvent imprévisible, en tout cas incertain, le comportement de ces systèmes. **Incertitude** et **imprévisibilité** constitue un couple inhérent à la complexité.

### 1.2.2. La notion de système

Le développement de l'approche systémique est intrinsèquement lié à celui de la pensée de la notion de **système**. Ce mot a pu être utilisé dans les lignes qui précèdent pour désigner une situation complexe. Il convient ici de tenter de définir plus rigoureusement cette notion sur laquelle s'appuie l'approche systémique.

La définition la plus courante du mot système tient en ces quelques mots: « *un ensemble d'éléments en interaction.* » Une telle définition, par trop générale, ne saurait suffire à donner un cadre rigoureux à cette notion. Une seconde définition, relativement répandue elle aussi, s'exprime en ces termes: « *un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but.* » Outre la caractérisation de l'interaction, **dynamique**, et non statique, cette définition introduit l'idée de **finalité**, notion qu'il conviendra d'interroger ultérieurement. Bien que plus complète, cette définition n'en apparaît pas moins à nouveau très générale. La tentative de saisie du concept de système par le truchement de l'exercice de définition semble donc vouée à un relatif échec. L'imprécision inhérente à des définitions par trop générales condamnent de telles ébauches à la stérilité. Néanmoins, il ne faudrait pas en conclure, loin s'en faut, qu'il faille abandonner tout espoir de saisir la notion de système. Simplement, cette tentative d'appréhension doit plutôt se faire par l'enrichissement indirect du concept de système à travers la description des principales **caractéristiques et propriétés** des systèmes.

Quelque soit le niveau de complexité des systèmes, ceux-ci présentent un certain nombre de caractéristiques communes :

- tout d'abord, sous peine de disparaître, les systèmes sont en relation permanente avec leur **environnement**. On parle de **l'ouverture** du système. Les systèmes que nous serons amenés à étudier sont en interaction constante avec leur écosystème qu'ils modifient et qui les modifie en retour ;

- ensuite, les systèmes peuvent être décrits par un certain nombre d'**éléments** tels que leurs composants, les relations entre ceux-ci, leur frontière, etc. Une méthode classique utilisée pour étudier un système est la double caractérisation par l'aspect **structural** et l'aspect **fonctionnel**. L'aspect structural correspond à l'organisation dans l'**espace** des différents éléments du système alors qu'à travers l'analyse fonctionnelle, il s'agit plus particulièrement de caractériser les phénomènes dépendant du **temps**: flux, échanges, transfert... Ainsi, les principaux traits structuraux de tout système sont sa frontière, ses éléments constitutifs, les réservoirs ou stocks, et les principaux réseaux de communications. Les traits fonctionnels du système, quant à eux, sont les flux d'énergie, de matière ou d'information, les vannes contrôlant les débits des différents flux, les délais et les boucles de rétroaction ;
- les systèmes sont ensuite caractérisés par le principe d'**arborescence**, c'est-à-dire que les éléments de tout système sont hiérarchisés en niveaux d'organisation, ce qui légitime en particulier la décomposition d'un système en **sous-systèmes** ;
- les systèmes sont **finalisés**. La finalité qui détermine le comportement du système de manière transcendante se manifeste par exemple par l'extraordinaire capacité des systèmes à maintenir leur équilibre par des phénomènes de régulation ;
- les systèmes ont besoin de **variété**, condition sine qua non à la capacité d'adaptation, et donc de survie, de tout système ;
- enfin, les systèmes sont **auto-organiseurs**. Entendons par là qu'ils possèdent la double capacité à l'adaptabilité et au maintien de la cohérence interne en vue de la finalité qui est la leur. Cette capacité repose en grande partie sur l'équilibre assuré par la complémentarité des rôles amplificateur des boucles de rétroaction positives et régulateur des boucles de rétroaction négatives.

### 1.2.3. L'approche systémique : de quoi s'agit-il?

Si la définition des notions de complexité et de système à travers celle de leurs différentes caractéristiques en permet une meilleure appréhension, elle ne suffit en aucun cas à fournir les clés de leur connaissance, et elle autorise encore moins l'action en univers complexe. Seul le développement d'un système de **représentation** suffisamment élaboré, c'est-à-dire lui même relativement complexe, peut laisser espérer avoir pris un jour sur la complexité du monde. C'est l'élaboration d'un tel système de représentation, en rupture avec la vision réductionniste de la pensée analytique, qui est au coeur des travaux des systémiciens depuis plus d'un demi-siècle.

#### 1.2.3.1. Ce qu'elle n'est pas

Parler de ce qu'est l'approche systémique, c'est d'abord préciser *ce qu'elle n'est pas*. Il convient en effet dans un premier temps de situer cette approche par rapport à d'autres approches avec lesquelles elle est souvent confondue. Ainsi, la cybernétique, évoquée maintes fois dans ce dossier comme l'étude des mécanismes de régulation chez les machines et les êtres vivants, constitue une approche particulière qui s'inscrit dans le courant systémique sans pour autant en recouvrir totalement la définition. Elle se distingue par ailleurs de la théorie générale des systèmes de von Bertalanffy qui s'attache à décrire et englober, dans un formalisme mathématique, l'ensemble des systèmes rencontrés dans la nature. L'approche systémique ne se confond pas non plus avec l'analyse de système qui ne représente qu'un des outils dont dispose le systémicien. Prise isolément, elle conduit à la réduction d'un système en ses composants et en interactions élémentaires.

### 1.2.3.2. Approche analytique VS approche systémique

La démarche de la pensée est à la fois analytique et synthétique, détaillante et englobante. Dans ces conditions, la mise en oeuvre d'une double approche analytique et systémique apparaît comme une démarche des plus naturelles. En effet, au delà de l'irréductibilité de ces deux approches l'une à l'autre, existe une profonde et nécessaire **complémentarité** de points de vue qu'il s'agit moins d'opposer que de rapprocher dans la même démarche de compréhension. L'approche analytique permet la décomposition d'un système en ses éléments simples et l'étude des interactions entre ses éléments. Ensuite, la modification d'une variable à la fois permet de déduire les propriétés quant au comportement du système. La loi d'additivité des propriétés élémentaires permet de déduire le comportement global dans le cas d'un système simple. Mais cette loi n'est plus valable dans le cadre de l'étude de systèmes de haute complexité. De tels systèmes doivent dès lors être abordées par les méthodes de l'approche systémique. En effet, de son côté, le systémicien considère le système dans sa totalité, dans toute sa complexité et sa dynamique propre. De Rosnay [DE ROSNAY : 1975] synthétise cette **dichotomie** dans le tableau suivant :

#### Approches analytique et systémique

| Approche analytique  | Approche systémique  |
|--|--|
| Isole : se concentre sur les éléments.   | Relie : se concentre sur les interactions entre les éléments.  |
| Considère la nature des interactions.  | Considère les effets des interactions.   |
| S'appuie sur la précision des détails.   | S'appuie sur la perception globale.  |
| Modifie une variable à la fois.  | Modifie des groupes de variables simultanément.  |
| Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles.                                     | Intègre la durée et l'irréversibilité.   |
| La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie.                | La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité.  |
| Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action (exemple : modèles économiques). | Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action (exemple : modèles du Club de Rome). |
| Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles.                                      | Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes.   |
| Conduit à un enseignement par discipline (juxta-disciplinaire).  | Conduit à un enseignement pluridisciplinaire.  |
| Conduit à une action programmée dans son détail.   | Conduit à une action par objectifs.  |
| Connaissance des détails, buts mal définis.  | Connaissance des buts, détails flous.  |

Source : J. de Rosnay, 1975

### 1.2.3.3. Les concepts de base

L'approche systémique, qui considère le système dans sa globalité, s'appuie sur un certain nombre de **concepts** qu'il s'agit de décrire ici.

#### 1.2.3.3.1. Représentation des systèmes

Il existe diverses façons de **représenter** les systèmes. La manière la plus courante est celle qui consiste à représenter le système dans son rapport avec son environnement, et de figurer les échanges d'énergie, de matériau et d'informations. C'est la forme de représentation connue sous le nom de **boîte noire** dans laquelle le système apparaît comme un transformateur de variables d'entrée en variables de sortie. On ne se préoccupe pas dans un premier temps de savoir ce qui se passe à l'intérieur de la boîte.

##### La notion de système



Cette représentation suppose d'une part que le système est un système ouvert, d'autre part que les limites du système sont clairement définies. Or, ces propriétés sont loin d'aller de soi. Ainsi, la notion de frontière d'un système n'est pas exempt d'un certain flou en systémique et la démarche consistant à définir les limites du système implique toujours une part de convention et d'arbitraire de la part de l'observateur. Dans ces conditions, le caractère ouvert du système n'est pas sans poser quelque question. La limite est poreuse et son franchissement n'est pas toujours discernable avec précision. Un autre type de représentation des systèmes permet de rendre compte de ces interrogations en proposant de distinguer trois niveaux concentriques d'**espaces d'interaction** dans le rapport du système avec son environnement :

- le **milieu intérieur** qui recouvre l'espace des relations pouvant être qualifiées d'internes ;
- le **milieu extérieur** qui a trait aux relations habituelles que le système entretient avec son environnement. Ces échanges se font au travers des limites
- le **milieu englobant** qui désigne l'environnement dans son sens le plus large.

#### 1.2.3.3.2. Structure des systèmes

L'analyse de la structure du système est l'objet de la méthode classique de double caractérisation par les descriptions structurale et fonctionnelle précédemment évoquées.

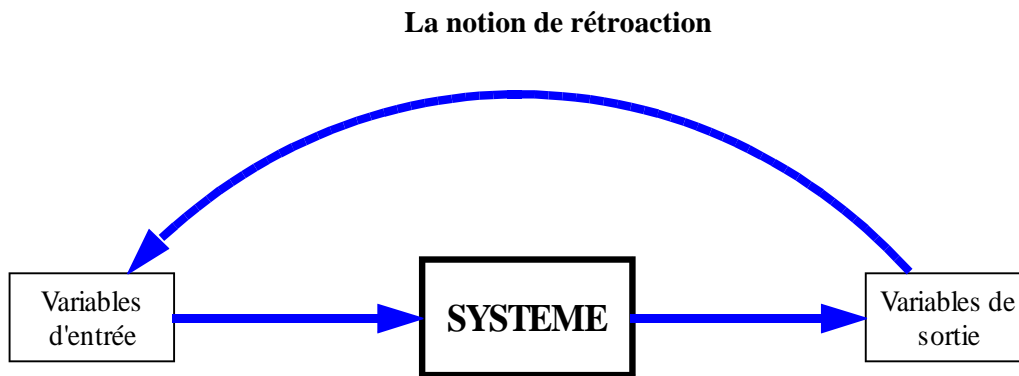
#### 1.2.3.3.3. Variables de flux et variables d'état - « *Stock and Flow* »

Quelque complexe qu'il soit, tout système est constitué d'un certain nombre de **variables** qui sont généralement de deux types: les **variables de flux** et les **variables d'état** (ou variables de niveau). Les variables de flux traduisent l'écoulement d'une grandeur, mesuré par la quantité de cette grandeur qui s'écoule entre deux instants. Ces variables incluent donc le temps dans leur

définition et elle s'expriment généralement sous la forme mathématique d'une dérivée de la grandeur par rapport au temps. Les variables d'état traduisent elles la situation instantanée d'une des parties du système, l'accumulation au cours du temps d'une quantité données. Il s'agit d'un absolu, défini en lui-même et hors du temps. Ces deux types de variables sont liées à tout instant. Si l'on fige le temps à un instant  $t$ , les variables de flux disparaissent alors que les variables d'état, elles, sont définies par le niveau qu'elles ont atteint à cet instant  $t$ . Nous verrons dans le chapitre sur la dynamique des systèmes complexes quelques exemples permettant de mieux saisir la différence entre ces deux types de variables.

#### 1.2.3.3.4. La rétroaction comme mécanisme de base

Le phénomène de **rétroaction**, découvert notamment au travers du croisement des travaux de Wiener et Rosenblueth, est une notion tout à fait centrale, sinon la notion fondamentale, en approche systémique. Dans tout système, les entrées sont transformées en sorties par le transformateur. Les entrées résultent de l'influence de l'environnement sur le système, et les sorties de l'action du système sur l'environnement. On appelle alors **boucle de rétroaction**, ou **feedback loop** en anglais, le mécanisme qui renvoie à l'entrée du système, sous forme de données, les résultats d'une transformation ou d'une action dépendant de la sortie.



On distingue alors deux types de boucles de rétroaction :

- les **boucles de rétroaction positives** (ou amplifiantes): l'injection des données de sortie en entrée contribuent à faciliter et accélérer la transformation dans le même sens, à amplifier le comportement du système. Les effets sont cumulatifs (effet « boule de neige ») et le comportement est divergent, soit sous la forme d'une croissance exponentielle ou explosion, soit sous la forme d'une décroissance exponentielle qui aboutit à un blocage de l'action. Les boucles positives sont fondamentales dans la dynamique du changement ;
- les **boucles de rétroaction négatives** (ou stabilisantes): les données de sortie agissent en sens opposé aux résultats antérieurs. Ses effets tendent à stabiliser le système qui apparaît comme finalisé, tendu vers la réalisation d'un but qu'il cherche à atteindre. L'on comprend dès lors que ce sont ces boucles négatives qui tiennent une place fondamentale dans la dynamique du maintien, de l'équilibre.

À ces deux boucles les plus connues, on peut ajouter les boucles de rétroaction **ago-antagonistes** dont la polarité est ambivalente, c'est-à-dire susceptible suivant la situation d'être positive ou négative. Ces boucles sont particulièrement agissantes dans les systèmes biologiques et dans les systèmes sociétaux.

Le rôle de ces boucles de rétroaction sera approfondi dans le chapitre consacré à la dynamique des systèmes.

### 1.2.3.4. Régulation des systèmes

Michel Karsky et Gérard Donnadiou proposent pour le phénomène de **régulation** la définition suivante: « *La régulation est l'ensemble complexe des mécanismes d'ajustement que le système invente et met en oeuvre en permanence pour maintenir son équilibre interne et dans le même temps, s'adapter à l'évolution de son environnement.* »[DONNADIEU? KARSKY : 2002]

Les processus à la base de ce fonctionnement *finalisé* et *adaptatif* repose sur l'**articulation** des boucles de rétroaction positives et des boucles de rétroaction négatives, sous la pression permanente de l'environnement extérieur. Tout système présente donc deux types fondamentaux d'existence et de fonctionnement, le **maintien** et le **changement**. Dans le premier cas, ce sont les boucles négatives qui assurent la stabilité, alors que dans le second, c'est la domination des boucles positives qui entraînent le changement. La coexistence de ces deux dynamiques au sein de tout système permet au système de sauvegarder sa survie. Au delà de la finalité du simple maintien de l'équilibre initial, il existe donc au sein de tout système une finalité de la survie qui explique que, sous la pression de l'environnement, le système se modifie pour retrouver un équilibre. Dans un premier temps, les boucles positives prennent l'ascendant sur les boucles négatives pour déclencher et conduire une transformation du système, avant de laisser à nouveau les boucles négatives prendre le dessus et assurer le maintien d'un équilibre qui peut être tout à fait différent de la situation initiale.

#### 1.2.3.4.1. La dynamique du maintien

Les boucles de rétroaction négatives contribuent, en contrôlant les divergences des boucles positives, à stabiliser le système. Si l'on s'autorise à parler d'une dynamique du maintien, c'est que cette stabilisation, loin d'être un phénomène statique, s'appuie au contraire sur des processus dynamiques complexes. Elle consiste pour l'essentiel au maintien de l'**équilibre des flux** dans le système, qui est bien un processus dynamique en ce qu'il peut être adapté, modifié et modulé grâce à des réajustements permanents.

Il convient ici d'exposer en quelque mot le principe d'**homéostasie**<sup>4</sup>, c'est-à-dire de résistance au changement. Un système homéostatique est un système ouvert maintenant sa structure et ses fonctions par l'intermédiaire d'une multiplicité d'équilibres dynamiques. Les systèmes biologiques, écologiques et sociaux sont particulièrement homéostatiques. Ils s'opposent au changement par tous les moyens.

#### 1.2.3.4.2. La dynamique du changement

La dynamique de changement est un processus qui peut paraître paradoxal au sein de systèmes dont on a pu dire qu'ils sont caractérisés par une grande stabilité et dont la finalité est de maintenir leur équilibre. Pourtant, leur capacité à évoluer, liée à l'existence des boucles positives, est fondamentale pour leur survie. En effet, une des conditions de la stabilité d'un système tient en sa capacité à pouvoir mettre en oeuvre une large palette de réponses aux formes possibles d'agressions de l'environnement. Or, la largeur de cette palette se mesure à la **variété** du système. Donc, la variété, et par conséquent la complexité du système avec laquelle elle a partie liée, sont facteurs de stabilité pour le système. Dans ces conditions, l'on comprend mieux l'importance d'une dynamique visant à l'**accroissement de la complexité** du système dans le processus plus global de régulation. Les boucles de rétroaction positives, en amplifiant le moindre écart, participent de cette dynamique, apparaissant comme les véritables artisans de la **génération de variété**.

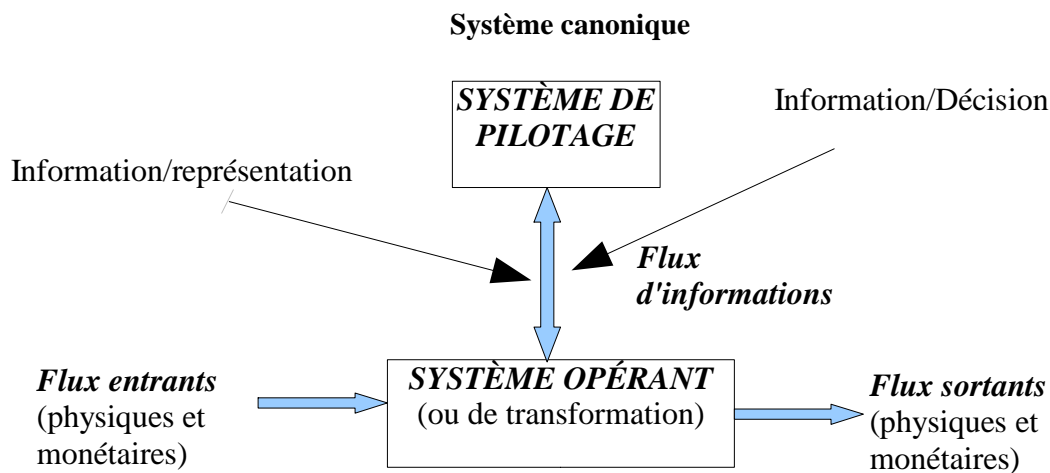
4 Homéostasie: terme créé par le physiologiste américain Walter B. Cannon pour désigner la résistance au changement d'un système lorsque celui-ci réagit à une perturbation par une rétroaction de grandeur égale et de sens opposé.



L'évolution du système, rendue possible par la dynamique de changement, se matérialise par une complexité de plus en plus élevée. De cette complexité toujours plus grande découle une propriété bien connue des systémiciens, la **propriété d'émergence**. L'accroissement de la diversité des éléments, celle du nombre de liaisons entre ces éléments et le jeu des interactions non linéaires conduisent à l'apparition de propriétés nouvelles, non prévisibles, et qui ne peuvent en aucun cas être expliquées par la somme des propriétés élémentaires propres à chacune des parties qui constituent le tout.

### 1.2.3.5. Niveaux d'organisation et régulation

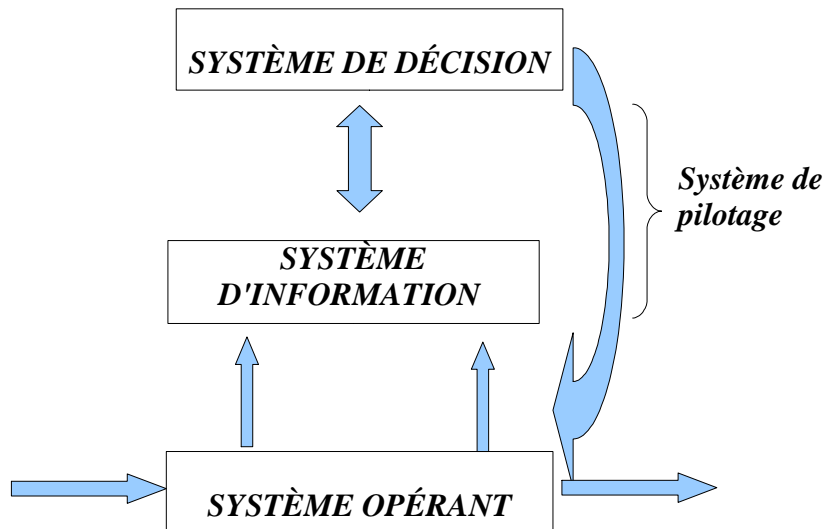
La régulation des systèmes repose donc fondamentalement sur l'articulation entre les différentes boucles de rétroaction. Or, cet arrangement est loin d'être le fruit du hasard. Au contraire, il relève d'une organisation en **niveaux hiérarchiques** dont l'architecture tout en emboîtement traduit le caractère finalisé à chacun de ces niveaux. En quelque sorte, chaque niveau d'organisation supérieur englobe le niveau d'organisation inférieur et projette sur celui-ci sa finalité. Le degré de complexité d'un système peut ainsi être mesuré **au nombre et à la nature des différents niveaux d'organisation qui le composent**. Dans son ouvrage *La théorie du système générale*, Jean-Louis Le Moigne propose une **typologie des systèmes** basée sur la structure des différents niveaux d'organisation. Les **systèmes de degré un**, ou **système canonique**, correspondent à une organisation constituée d'un *système de pilotage* et d'un *système opérant*. Le système de pilotage assure la régulation, le système opérant la transformation.



Source : Karsky, Donnadieu, 2002

Des systèmes de complexité de **degré 2** correspondent à l'émergence du *système d'information* dans la structure de complexité de degré 1 :

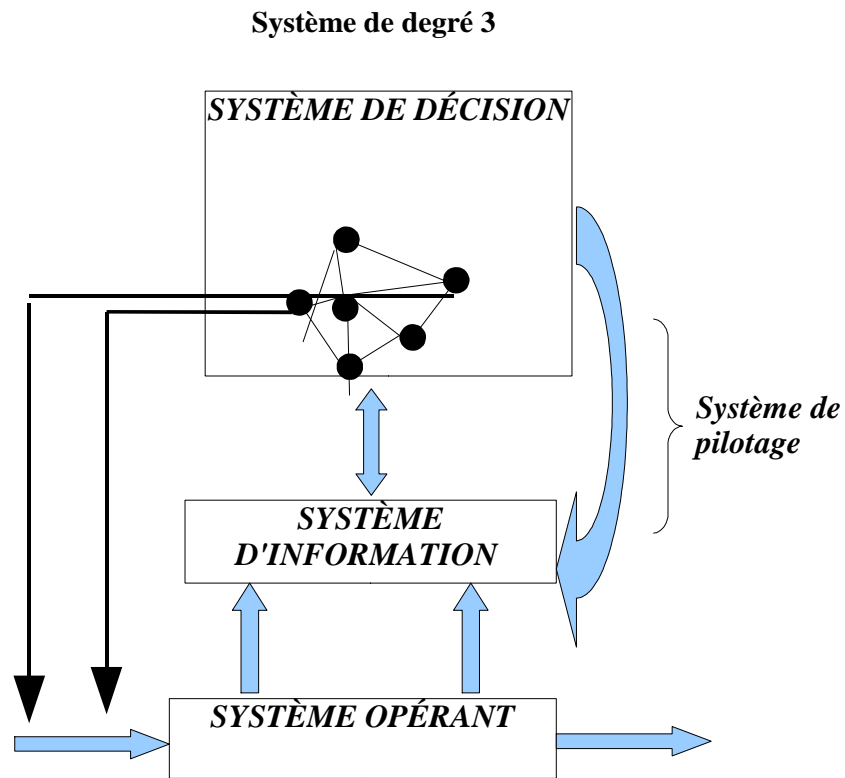
**Système de degré 2**



Source : Karsky, Donnadiou, 2002

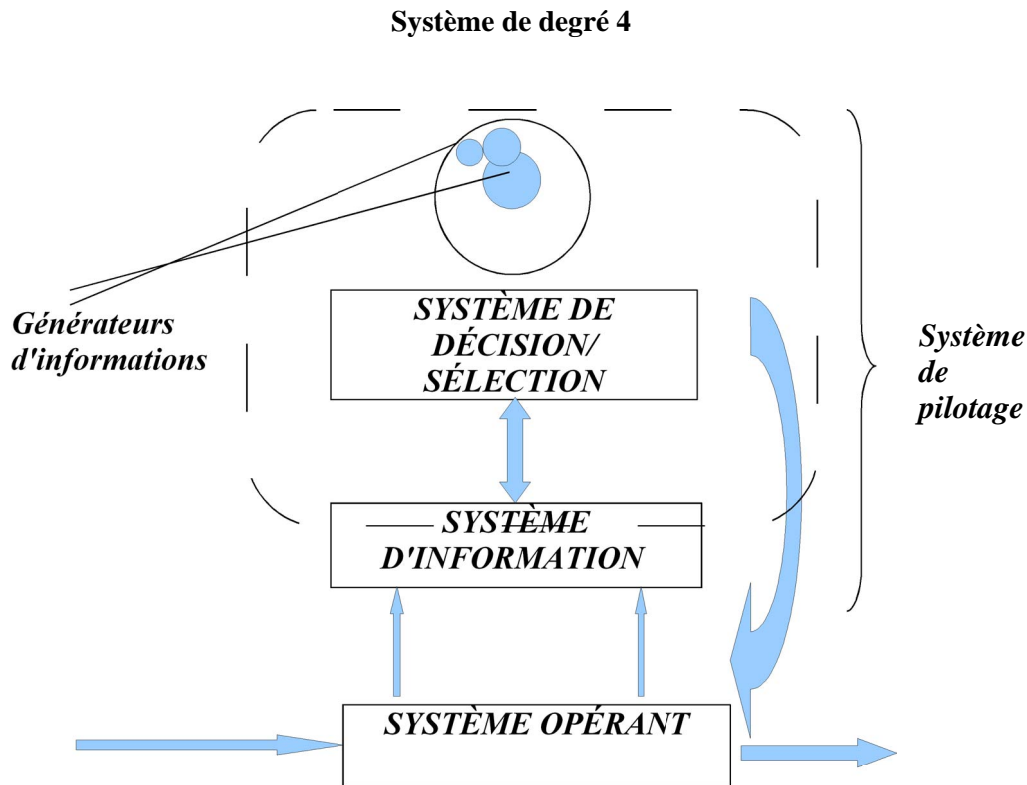
Partie prenante du système de pilotage, la vocation du système d'information est d'assurer le couplage entre le système opérant et le reste du système de pilotage qui prend alors le nom de système de décision. Son rôle est de produire et d'enregistrer les informations liées à l'activité du système opérant.

Le passage au **troisième degré** de complexité d'un système correspond à un accroissement de la *densité d'interconnexion des divers processeurs décisionnels* qui composent le système de décision.



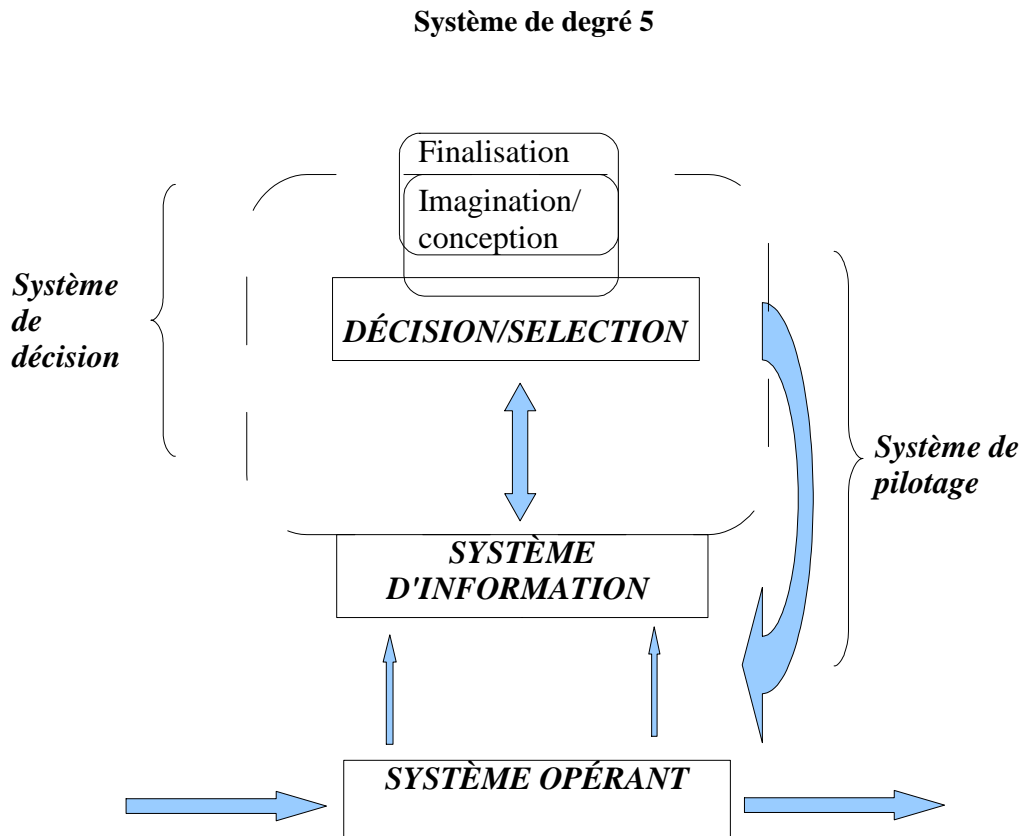
Source : Karsky, Donnadiou, 2002

Le passage au **degré 4** de complexité correspond au passage au degré **d'auto organisation**. Le système imagine des solutions nouvelles et s'auto organise pour mieux réaliser sa finalité. Il dispose pour cela de générateurs internes produisant de manière aléatoire des informations susceptibles de recevoir une interprétation dans le cadre du code sémantique qui gouverne le système. Ce degré caractérise tous les êtres vivants.



Source : Karsky, Donnadiou, 2002

Enfin, il existe un **degré 5** de complexité qui correspond à l'acquisition par les systèmes de la propriété **d'autofinalisation**. Le système se donne à lui-même ses objectifs et ses projets. Cette propriété émerge avec la conscience réfléchie spécifique à l'homo sapiens. Mais elle ne caractérise pas seulement l'individu mais également toutes les constructions sociales et sociétales dans lesquelles l'homme entre comme composant.



Source : Karsky, Donnadiou, 2002

#### 1.2.4. Quelques méthodes systémiques

La systémique a cette particularité de s'être développée dans le même temps à la fois comme ensemble de représentations et de concepts, ou épistémologie, et comme ensemble de méthodologies, ou démarche de pensée. En d'autres termes, en même temps qu'elle construisait les principes qui contribuent à lui donner le statut de Science, elle se constituait comme méthode d'observation et d'action. Cette démarche de pensée est sous tendue de part en part par **l'axiome constructiviste** qui établit le caractère à la fois limité et irremplaçable de toute représentation. La connaissance est conçue ici comme le **processus de construction de la connaissance**, dans un mouvement continu d'interaction avec le monde empirique qui constitue le terrain d'expérimentation pour des représentations orientant des actions. L'observateur construit des représentations du monde extérieur qui lui permettent de s'y orienter et d'agir sur ce monde. Ces représentations ne donnent pas accès aux essences de l'objet considéré, mais elles ne sont pas non plus de simples émanations du sujet connaissant, sans rapport aucun avec l'objet observé. La connaissance, de nature composite, est donc le fruit d'une **interaction**

**indissociable entre le sujet connaissant et l'objet.** Elle est un ensemble de représentations *vraies*, mais qui restent limitées et partielles.

La conception systémique de la connaissance renvoie donc le sujet connaissant à une place inédite par rapport à celle qu'il occupait dans la démarche analytique ou classique. L'observateur se projette inéluctablement dans la démarche d'observation et n'est par conséquent jamais extérieur à l'objet observé. Cette spécificité de la conception systémique de la connaissance détermine fondamentalement les méthodes mises en œuvre dans l'approche systémique.

#### 1.2.4.1. Les étapes de la démarche systémique

Ce que l'on désigne par les divers termes d'analyse de système, d'analyse systémique, de modélisation ou encore de simulation, constituent autant de méthodes mises en œuvre dans la démarche systémique. Cette dernière consiste en trois étapes correspondant à **trois niveaux successifs d'acquisition de connaissances** dans l'étude d'un système complexe.

##### 1.2.4.1.1. L'analyse de systèmes ou exploration systémiques

Au cours de cette phase, il s'agit pour l'observateur de se constituer une première connaissance du système étudié. Pour cela, un certain nombre de règles sont à respecter. Cette étape consiste ainsi dans un premier temps à définir les **limites du système** à étudier et à le situer par rapport à son environnement. Un soin tout particulier doit notamment être apporté à la compréhension de la nature et de la finalité des échanges qu'il entretient avec celui-ci. La mise en évidence de l'architecture interne du système forme une part importante du travail à effectuer au cours de cette première phase. Il s'agit pour l'essentiel de dégager les **éléments** les plus importants et les **interactions** entre ces éléments, d'identifier les variables de flux et les variables d'état, les boucles de rétroaction ainsi que leur polarité et les délais éventuels. Enfin, au terme de cette première phase, l'observateur devra se forger une connaissance de l'histoire du système suffisante pour être en mesure de comprendre son évolution. Les outils méthodologiques utilisés dans cette première étape feront l'objet d'une partie ultérieure.

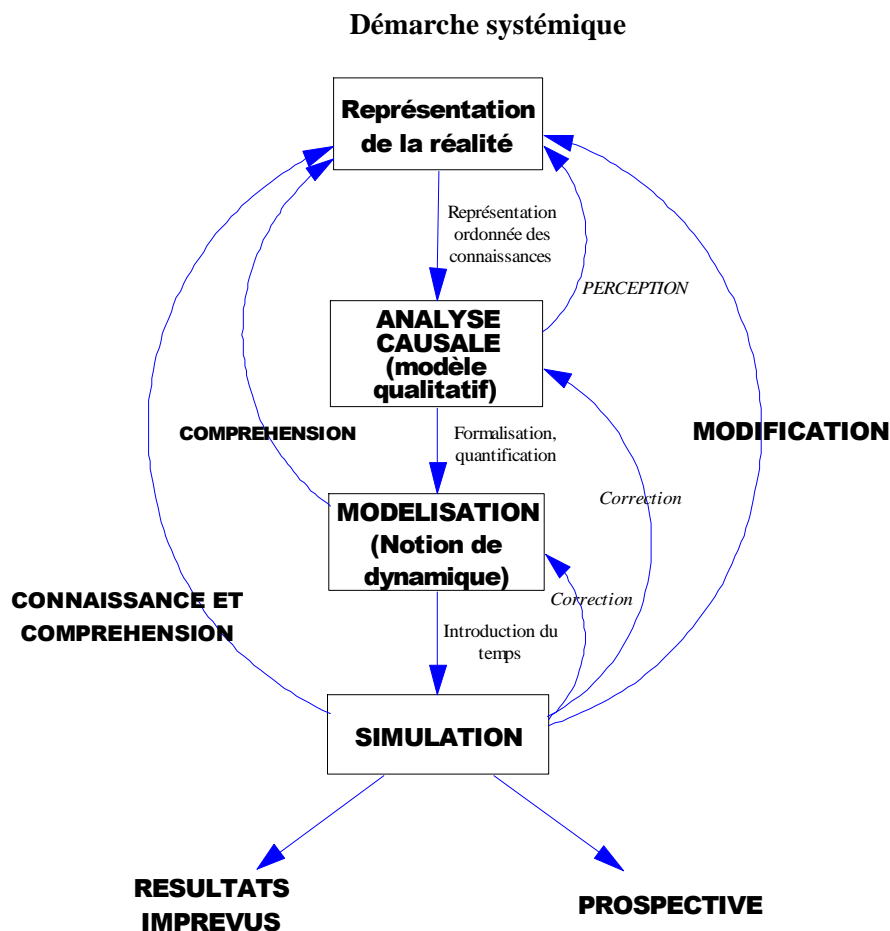
##### 1.2.4.1.2. La modélisation qualitative

L'approche systémique consiste dans une seconde phase à modéliser le système sur la base des connaissances acquises au cours de l'exploration systémique. C'est la phase de construction d'une représentation qui mette en évidence la structure et le fonctionnement du système. Conformément à l'axiome constructiviste qui sous-tend l'approche systémique, la subjectivité de l'observateur est indissociable de la construction du modèle. Celui-ci offre une **représentation du système** sous la forme d'un *schéma* sur lequel apparaissent les éléments formant le système : variables de flux et d'état, relations entre variables, paramètres extérieurs, délais, etc. Cette figuration sous la forme d'un schéma ou diagramme est aujourd'hui relativement normalisée. Nous reviendrons sur l'existence d'une certaine **normalisation** des symboles dans le chapitre consacré à la dynamique des systèmes. Au terme de cette étape, le modèle obtenu ne peut faire l'objet de simulations et ne possède par conséquent aucune valeur **prédictive**. Néanmoins, la construction du modèle qualitatif est probablement la phase la plus importante dans le processus de connaissance d'un système. L'essence même de l'approche systémique s'exprime dans ce mouvement circulaire et itératif entre le sujet connaissant et le système étudié. Le modèle qualitatif fournit déjà des éléments importants autorisant à mettre en évidence les propriétés du système et à dresser des conclusions intéressantes quant à son comportement. Dès cette seconde étape apparaissent des résultats **contre intuitifs** caractéristiques de la démarche systémique.

### 1.2.4.1.3. La modélisation dynamique ou simulation

Lors de la phase de modélisation qualitative, le systémicien s'efforce de caractériser et de traduire dans le formalisme mathématique, lorsque cela lui est possible, les relations existant entre les différents éléments du système. À l'abord de la troisième étape dite de **modélisation dynamique**, le systémicien dispose donc d'un modèle qu'il lui faut rendre simulable ou opérable par la **quantification** des relations mathématiques établies précédemment et surtout, par l'introduction de la variable temps. Cette méthode débouche selon les cas sur deux types de configurations :

- dans la première situation, le modèle obtenu est difficile ou laborieux à simuler. Dans ces conditions, le systémicien peut choisir de procéder à une modélisation dynamique par **analogie** consistant à substituer au modèle initial un modèle dont la structure et le fonctionnement sont les mêmes, mais qui apparaît comme moins lourd à mettre en œuvre ;
- dans le deuxième cas, le modèle est opérable sur ordinateur. Le systémicien effectue alors un certain nombre de simulations. Il fait varier les paramètres qui lui semblent jouer un rôle important et les données initiales, ceci afin d'approfondir sa connaissance du fonctionnement du système. Lors de cette phase d'expérimentation, il construit et étudie des **scénarios alternatifs**, à des fins prospectives par exemple. La simulation lui permet de dessiner des futurs possibles, d'envisager l'improbable, et surtout d'imaginer des solutions à des problèmes qui se posent au moment où il travaille ou qui ont des chances de se poser un jour.



Source : Karsky, Donnadiou, 2002

La simulation numérique correspond au degré ultime de l'approche systémique. L'impossibilité de mener à ce terme le processus de modélisation d'un système, relativement fréquente dans le cas des systèmes sociaux, ne doit pas être lue comme un échec par le systémicien. Nous avons insisté sur l'importance de la phase de modélisation qualitative dans la démarche consistant à rendre intelligible le comportement du système. Conformément à l'objectif d'acquisition de la meilleure compréhension possible de l'observable, le systémicien devra chercher à pousser la démarche jusqu'au bout. Mais dans le cas où le passage à la simulation s'avèrerait impossible, la limitation de son travail à la deuxième, voire à la première étape, se montrera de toute façon le plus souvent fructueuse et riche d'enseignements.

#### 1.2.4.2. Quelques méthodes systémiques

Le qualité de la mise en œuvre de l'approche systémique dépend en grande partie des méthodes utilisées au travers des différentes phases décrites plus haut. Ce paragraphe a pour objet de fournir un aperçu non exhaustif des **méthodologies** dont dispose le systémicien dans sa confrontation avec le système étudié.

##### 1.2.4.2.1. La triangulation systémique

La première et la plus répandue de ces méthodes est connue sous le nom de **triangulation systémique**. Remarquablement adaptée à la phase d'exploration systémique, elle part du constat qu'un système complexe peut généralement être observé sous trois angles différents mais complémentaires, chacun lié à un point de vue particulier de l'observateur. Celui-ci développe alors une étude en trois points, portant successivement son attention sur l'aspect **structural** du système, son caractère **fonctionnel**, et l'envisageant enfin dans toute sa perspective **historique**. Sans reprendre dans le détail le principe des descriptions structurale et fonctionnelle, on rappellera simplement que l'aspect structural renvoie à la manière dont le système est composé alors que l'analyse fonctionnelle traite de la finalité du système. Quant à l'étude historique, elle est rendue nécessaire par la nature évolutive du système, qui rend incompréhensible sa nature actuelle et son fonctionnement sans la référence à son passé.

##### 1.2.4.2.2. Le découpage systémique

Cette méthode particulière entre en jeu dans le volet structural de la triangulation systémique. Contrairement à ce que sa dénomination pourrait laisser penser au premier abord, il ne s'agit pas pour appliquer cette méthode de reproduire la décomposition analytique chère au positivisme. Le découpage dont il est question ici ne renvoie pas à une descente au niveau le plus élémentaire du système comme l'entendrait la pensée analytique. Une telle entreprise serait contre productive dans une démarche visant moins à la compréhension des éléments du système pris séparément qu'à celle des comportements induits par les relations qu'ils entretiennent entre eux. Le **découpage systémique** consiste donc à identifier les **sous-systèmes**, avant de caractériser, comme pour le système global, leurs frontières, leurs finalités et les connections qui déterminent leur interdépendance. Dans cette tâche, le systémicien peut s'appuyer sur l'existence de quelques critères qui l'aideront à identifier les différents sous-systèmes : le critère de finalité, celui de la structure, du niveau d'organisation ou encore le critère historique.



#### 1.2.4.2.3. L'analogie

L'histoire du développement de la systémique fait apparaître le dialogue permanent entre des domaines scientifiques éloignés seulement en apparence. Les concepts nés des résultats obtenus dans l'un se révèlent valables et transposables dans un autre. Ce **décloisonnement** des disciplines propre à la systémique est venu en quelque sorte restaurer la valeur du **raisonnement par analogie** dans le discours scientifique. Trois méthodes s'inspirent de la richesse de ce raisonnement en systémique. Ainsi, l'observateur a-t-il à sa disposition la métaphore pour établir des correspondances entre deux systèmes de nature différente. L'**homomorphisme** renvoie de son côté à la possibilité de substitution à un système trop lourd à exploiter par un système analogue mais plus maniable. Enfin, l'**isomorphisme**, valable essentiellement pour les systèmes à faible complexité, établit une correspondance entre tous les traits de l'objet étudié et ceux d'un modèle censé reproduire une image de l'original où rien n'a été oublié en terme de fonction et de structure.

### 1.3. Une approche systémique de la ville

L'approche systémique, telle qu'elle se conçoit à ce stade de notre étude, renvoie donc à la fois au courant de pensée qui poursuit encore aujourd'hui sa quête d'épistémologie, et à la démarche de pensée propre à cette science. L'apparition de cette approche a pu être lue par ses partisans les plus enthousiastes comme une véritable rupture de paradigme par rapport au positivisme dominant. S'il semble prématuré d'engager le statut de la systémique sur cette voie, il convient néanmoins de souligner à quel point le développement de cette approche est à l'origine de la remise en question systématique du recours à la pensée analytique pour aborder des objets dont la complexité établie rend caduque la démarche classique. Cette critique ébranle les pratiques avérées dans de nombreux domaines, et plus particulièrement dans ceux des sciences humaines et sociales telles que l'économie, la gestion, l'anthropologie ou encore la psychologie. Au delà du mouvement de déconstruction des idées reçues, la confrontation de l'approche systémique à la diversité de ces questions s'accompagne de l'enrichissement réciproque de la connaissance de l'objet et de la démarche connaissante.

L'**objet ville**, jusque tout récemment, était systématiquement abordé par des méthodes très analytiques, caractérisées par le cloisonnement des études à des aspects très particuliers : transport, urbanisme, sociologie urbaine, environnement, etc. Rares étaient les tentatives de croisement de ces différentes approches dans une perspective transversale. Or, face aux insuffisances de la pensée classique et, à l'inverse, au regard des potentialités de la pensée systémique, il semble légitime de chercher à traiter la ville comme un objet complexe susceptible d'être envisagé sous un **angle systémique**. Dès lors, la question qui se pose est celle de la nature d'une telle approche et de sa mise en œuvre.

#### 1.3.1. La ville comme système complexe

La métaphore de l'organisme vivant est très souvent sollicitée pour parler de la ville. Parfois abusivement d'ailleurs, en ce que son emploi témoigne, en même temps qu'il contribue à le renforcer, d'un sentiment d'urbaphobie, d'une sorte de peur irrationnelle de la grande ville. Néanmoins, au delà de cet aspect secondaire qui nous intéresse peu ici, cet usage inflationniste de l'analogie renvoie à la difficulté de saisir l'objet ville par une approche directe. De manière intuitive, il semble donc relativement immédiat de pouvoir considérer la ville comme un **système complexe**. Néanmoins, dans un souci de prudence et de rigueur, il convient d'interroger plus avant la nature complexe de la ville.

Et d'abord, quand on parle de La Ville, de quelle ville s'agit-il? Quelle commune mesure entre Parthenay, sous-préfecture des Deux Sèvres, de 20 000 habitants, Lagos ou Sao Paulo mégapoles multimillionnaires en habitants, Singapour ou Hong Kong, les cités États ou encore ces Ranstädte, agglomérations tentaculaires à cheval sur plusieurs états. La France, 60 millions d'habitants a 36000 Communes, autant que tout le reste de l'Europe; la Chine, plus d'un milliard d'habitants, en a six mille. Plus que de villes, il faudrait parler de territoires, ou de **territoires urbains**. En d'autres termes, la problématique de la définition de la **frontière du système ville** laisse déjà entrevoir la complexité de l'objet. Par ailleurs, quelque soit la manière dont il est déterminé, le choix de la frontière fait apparaître l'environnement du système ville, constitué notamment par les villes qui l'entourent et avec lesquelles il est en interaction permanente.

Une fois située dans son écosystème, la ville émerge comme un **ensemble de composants inter-connectés** entre eux, de flux de matière ou d'information, de réseaux matériels ou de communication, de délais, etc. Autant d'éléments qui autoriseraient une double description fonctionnelle et structurale et qui contribuent à valider l'hypothèse de la ville comme système complexe. Le **critère d'arborescence** caractéristique des systèmes complexes s'applique au système ville, formé de nombreux sous systèmes en lien les uns avec les autres. Par exemple, le sous système des transports, celui de l'économie, celui de la population, celui de la gouvernance, etc.

Conformément à ce que l'on sait désormais de tout système complexe, la ville est **finalisée**, c'est-à-dire qu'elle tend vers un but, mais lequel? Supposons qu'il s'agit de manière simplifiée du but de survie. La condition de cette survie tient dans la double capacité du système ville à assurer sa continuité et à s'adapter aux modifications du milieu environnant susceptible de le perturber. Or, il semble bien que l'évolution des villes soit sous tendue par une double dynamique du changement et du maintien, confirmant par là la nature complexe du système ville. Le phénomène de croissance des villes, leur capacité à l'auto organisation, ou encore le regroupement spatial renvoient plutôt à la **dynamique du changement** alors que l'existence d'une certaine mémoire, physique et symbolique de la ville ou les réticences que rencontrent certains projets urbains tendent à illustrer le **caractère homéostatique** de la ville entendue dans son sens le plus large.

On peut donc bien, en première lecture, considérer la ville comme un système complexe, susceptible d'être appréhendé par une approche systémique. Par rapport à la typologie des systèmes selon leur degré de complexité, la ville se situerait même au niveau le plus élevé, eu égard à la propriété d'**auto finalisation** dont l'inclusion de l'homme dans ce système la dote.

### 1.3.2. Une ou des approches systémiques ?

L'axiome constructiviste qui sous tend l'approche systémique établit un lien inévitable entre le sujet connaissant et l'objet étudié. En d'autres termes, la subjectivité de l'observateur projette sur le système étudié le projet qu'il conduit. Pour l'étude d'un même système, il est donc possible de développer non pas *une*, mais *des* approches systémiques en fonction de l'intérêt du systémicien et des questions considérées. La ville, en tant que système complexe, n'échappe pas à cette règle. Par conséquent, l'exercice consistant à essayer de définir les cadres de ce que doit être l'approche systémique de la ville est voué à l'échec. L'appréhension de ce en quoi peut consister *une* approche systémique de la ville passera donc par le recours à la saisie indirecte de ce qui la caractérise à travers la description de deux tentatives de ce genre, celle de Joel de Rosnay et celle de Thierry Vilmin.

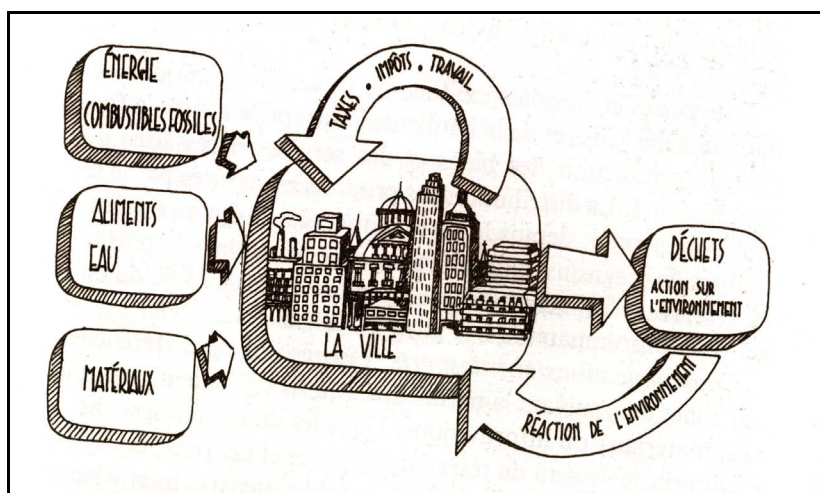
Dans son ouvrage *Le Macroscopie*, qui a fortement participé au développement de l'approche systémique en France, **Joel de Rosnay** se propose d'observer à travers son **macroscopie**, outil symbolique de l'approche systémique, de grands systèmes sociaux tels que l'entreprise, l'écologie, ou la ville. La question qu'il se donne à examiner en abordant la ville comme un système complexe est celle de savoir comment ce qui s'est inséré comme un milieu biologique externe se relie à l'homme et à l'écosystème. Dans son approche du système ville, il met en œuvre sans la nommer la méthode de **triangulation systémique**. L'accent est notam-

ment mis sur la description historique explicative de l'évolution des villes. La ville naît ainsi selon lui « *des besoins des hommes.* » [DE ROSNAY : 1975] Besoins physiologiques, mais aussi psychologiques. Les premières villes apparaissent il y a près de cinq mille ans. Le développement de ces premières villes est très rapide. Cependant, jusqu'à une date relativement récente, il n'existait pas de **société urbanisée** tel qu'on l'entend aujourd'hui, mais une société majoritairement rurale. Dans les premières grandes villes vivent les élites dirigeantes représentant le reste de la population. Avec la révolution industrielle, les moyens de communication se combinent et se renforcent pour attirer vers la ville des flux toujours plus importants de population. La métropole moderne naît « *de la densification urbaine, de l'extension verticale et horizontale des constructions, de l'organisation des moyens de communication et de la création de règlements et de codes permettant de contrôler les grandes fonctions de la ville.* » [DE ROSNAY : 1975] La ville, véritable « *machine à communiquer* » [DE ROSNAY : 1975], agit donc comme un **catalyseur**, accélérant le développement des idées philosophiques et religieuses, des sciences et des techniques, des arts et des concepts politiques. Et c'est bien « *la combinaison de ces facteurs au sein de la ville [qui] a contribué au développement quasi explosif des grandes métropoles* » [DE ROSNAY : 1975] au cours du XX<sup>e</sup> siècle.

Les descriptions structurale et fonctionnelle sont menées de front et Joel de Rosnay choisit de recourir pour ce travail à l'outil analogique en comparant la ville à un organisme vivant, trahissant ainsi sa vocation première pour les sciences de la vie biologie et biochimie. « *À la manière du récif de corail, de la ruche ou de la termitière, la ville est à la fois support et conséquence de l'activité de l'organisme social qui vit en son sein.* » [DE ROSNAY : 1975] D'où la difficulté de séparer structure et fonction. Joel de Rosnay s'emploie ensuite méthodiquement à identifier les différents éléments qui composent la ville en même temps qu'il s'intéresse à la manière dont ces éléments entrent en interaction pour assurer le fonctionnement du système. La ville est à la fois ensemble de rues, d'avenues, de pâtés de maisons, mais aussi de gares, de monuments, d'hôpitaux ou d'organismes administratifs, et elle est le lieu de flux d'énergie, de matériaux et d'informations entre ces différentes entités. Les **grandes fonctions** du système urbain sont : « *utilisation d'énergie et élimination des déchets ; production, consommation et administration ; culture et loisir, information ; communications et transports ; protection et sécurité.* » [DE ROSNAY : 1975] Cette organisation fonctionnelle induit une **organisation structurelle différenciée**, chaque élément matérialisant une fonction : les logements, les entreprises et les commerces, les communications et moyens de transports, les organismes administratifs et financiers, les systèmes de distribution de l'énergie et d'élimination des déchets, qui, selon lui, s'organise par quartier. Enfin, il décrit le « *métabolisme des villes* » [DE ROSNAY : 1975] conçues comme un ensemble de mouvements et d'échanges d'énergie, de matériaux, de travailleurs, de population, etc.

Au terme de cette analyse qui constitue finalement la phase d'**exploration systémique**, de modélisation verbale, Joël de Rosnay ne s'engage pas à proprement parler dans une phase de modélisation qualitative. Néanmoins, il offre une synthèse de l'analyse menée jusqu'ici sous la forme d'un schéma qui pourrait constituer l'ébauche de la réflexion propre à cette phase.

## Une représentation systémique de la ville



Source : J. de Rosnay, 1975

Au terme de son analyse systémique, Joël de Rosnay conclut à un **fonctionnement autorégulé** de la ville qui « *contrôle et équilibre les flux des individus entre son centre et sa périphérie.* » [DE ROSNAY : 1975] L'évolution de ce système est caractérisé par le passage par une phase de croissance explosive, suivie d'une période de stabilisation, puis de stagnation, voire de dégénérescence parfois, au moins de certains quartiers.

**Thierry Vilmin**, socio-économiste de formation, adopte une démarche foncièrement différente de celle de Joël de Rosnay. Dans un ouvrage intitulé *L'Aménagement en France, une approche systémique*, [VILMIN : 1999] il considère le système ville non plus comme le support de l'activité humaine, ensemble d'éléments et de flux autorégulés, mais comme la **résultante de l'interaction entre les outils et les acteurs de l'aménagement urbain**. Plus qu'à une approche systémique de la ville, ses travaux proposent finalement une **approche systémique de l'aménagement urbain**, envisagé comme un **système d'acteurs**. Il privilégie les interactions entre les procédures, les techniques, les formes urbaines et les financements.

La ville est conçue comme un **système ouvert**, organisé et régulé. Thierry Vilmin considère alors son gouvernement local, la mairie, comme la puissance régulatrice de ce système. Le degré d'ouverture de ce système renvoie à la maîtrise qu'en a la collectivité locale dans différents domaines. Thierry Vilmin identifie six catégories d'éléments qui composent le contexte français de l'urbanisme décentralisé : le sol (ou le foncier), les équipements, le bâti, les activités de production de biens et de services, la population et enfin les documents d'urbanisme et de droit des sols. Sur chacun de ces registres, les moyens d'action de la collectivité sont relativement inégaux. Thierry Vilmin montre qu'en définitive, les domaines sur lesquels la commune a une prise directe sont ceux qui concernent l'**aménagement de son espace** : la gestion foncière, le droit des sols, les équipements publics et leur financement. Néanmoins, dans le système de l'aménagement urbain, l'action sur l'un de ces trois registres a des conséquences non négligeables sur les autres registres tels que la population par exemple. Dans son ouvrage, Thierry Vilmin choisit donc finalement de s'intéresser, sur un plan technique, à la manière dont le sous système de l'aménagement, isolé dans le système plus général de la ville, est géré par la **puissance régulatrice**, la collectivité locale. Il montre comment les communes opèrent cette régulation en maniant les trois leviers que sont l'action foncière, le financement des équipements, et le droit des sols, et comment ces actions ont des effets directs sur les trois domaines concernés, mais aussi des impacts latéraux sur les autres sous ensembles du système urbain. Thierry Vilmin montre alors qu'il existe quatre grandes familles d'outils ou filière de production urbaine que l'on a toutes les chances de retrouver simultanément sur un secteur. Ce sont le **développement en diffus**, la **mutation encadrée**, l'**aménagement négocié** et l'**aménagement**

**public.** Après avoir identifié ces quatre filières, il revient sur les mécanismes de formation des prix en fonction des filières. Mais, les filières n'étant pas indépendantes, chacune a une influence sur la situation foncière globale mais aussi sur les territoires des filières voisines. Thierry Vilmin examine alors ces **rapports entre filières de production et qualité de l'aménagement**. La conclusion qu'il tire est la suivante :

*« Aucune des quatre filières n'est donc la panacée qui engendrerait le juste équilibre entre ordre et variété. [...] En fin de compte, c'est la diversité elle-même des filières à l'échelle de la ville qui doit contribuer à la variété tout en manifestant l'ordre indispensable. »*

À ce stade de son étude, Thierry Vilmin s'appuie sur la théorie de la base économique pour éclairer son propos. Sans entrer dans le détail de son analyse, proposons immédiatement le schéma d'ensemble du système urbain proposé par l'auteur. En ne retenant que les principales interactions, ce schéma établit les relations entre les six domaines identifiés et les cinq catégories d'acteurs qui les mettent en mouvement.

À travers l'ouvrage de Thierry Vilmin apparaît donc une deuxième manière de traiter la ville par la systémique. Cette nouvelle approche se distingue en premier lieu de celle de Joël de Rosnay sur le **fond**, en ce que le système considéré n'est plus ici la ville conçue comme un ensemble de fonctions et d'éléments assurant ces fonctions, mais le sous système de l'aménagement urbain entendu comme la résultante de l'interaction entre les différents outils et les multiples acteurs de l'aménagement. Par ailleurs, la démarche mise en œuvre adopte une **forme** qui se distingue elle aussi de celle de l'étude de Joël de Rosnay. Ainsi, Thierry Vilmin s'appuie essentiellement sur le discours pour mener à bien son analyse et l'éclairage synthétique à l'aide d'un schéma fait parfois défaut. De plus, le style de Vilmin est assez loin de la rigueur de Joël de Rosnay lorsqu'il s'agit de poser les limites du système et de développer les grandes étapes de l'analyse systémique qui n'apparaissent d'ailleurs pas clairement. Pour conclure, on dira que l'approche de Thierry Vilmin est systémique dans le sens où la primauté est donnée à l'analyse des interactions entre les éléments du système défini, et à ce que ces interrelations produisent en terme de comportement du système. Par ailleurs, les grandes notions de l'approche systémique sont balayées tout au long de l'étude, à savoir les concepts d'interaction, de système, de sous système, de dynamiques de croissance et de maintien, d'effet direct et indirect, etc. Et si les notions de rétroaction et de boucles semblent ne pas faire l'objet d'une mise en valeur évidente, elles émergent ponctuellement, notamment dans le schéma reproduit ci dessus. Mais elle apparaît quand même comme relativement mécanique et les liens établis font parfois penser aux jeux urbains à travers la vision parfois « presse boutons » du fonctionnement de la ville.

Les approches présentées ne poussent pas au dernier degré de modélisation la démarche systémique appliquée à l'objet ville. Elles en restent à l'**étude verbale** voire à la modélisation qualitative, mais en revanche, elles ne passent pas à l'étape de la formalisation mathématique. Pour autant, l'intérêt de ces approches est indéniable, et elles offrent un aperçu inédit de l'intérêt de la systémique pour étudier les systèmes complexes, et plus particulièrement le système ville, quelque variées que puissent être les réalités auxquelles ce terme renvoie. Nous verrons dans le chapitre suivant, consacré à la dynamique des systèmes, qu'il est possible de pousser une approche systémique de la ville jusqu'au degré ultime de modélisation et de simulation numérique comme en témoignent les tentatives de Forrester ou aujourd'hui, d'ATN.

## 2. La dynamique des systèmes ou la systémique de l'ingénieur

Nous avons vu dans un premier chapitre que l'avènement de la systémique est inséparable du développement parallèle des trois grandes disciplines que sont l'informatique, la cybernétique et la théorie générale des systèmes. L'ensemble de ces disciplines constitue en fait la manifestation du **paradigme système**. Le paradigme de système peut être considéré comme l'ensemble des méthodes scientifiques qui, pour aborder la réalité, propose une approche **globalisante**, ou **holistique**, à l'opposé des méthodes analytiques au caractère réductionniste. La primauté est accordée à la prise en charge des interactions entre les parties, et non à l'analyse des parties isolées. C'est dans ce contexte que s'est développée sous l'égide du MIT la **dynamique des systèmes**, discipline qui est d'ailleurs souvent considérée comme une émergence spécifique qui s'inscrit dans le mouvement philosophique représenté par les trois disciplines majeures précédentes.

La dynamique des systèmes, selon une première définition empruntée à Aracil dans son *Introduction à la dynamique des systèmes*, « *n'est autre qu'une méthodologie destinée à la construction de modèles de systèmes sociaux, c'est-à-dire de systèmes socio-économiques, sociologiques et psychologiques, et dont les techniques peuvent aussi s'appliquer aux systèmes écologiques.* » [ARACIL : 1984] La dynamique des systèmes apparaît comme une tentative d'établir des techniques permettant l'expression dans un **langage formel**, celui des mathématiques, de **modèles verbaux** ou **mentaux** des systèmes sociaux. Cette discipline a aujourd'hui moins de cinquante ans, et elle connaîtra encore de nombreux développements, notamment en ce que les succès de sa mise en œuvre ont partie liée avec les progrès de l'informatique et les innovations méthodologiques. Néanmoins, le degré de développement qu'elle a atteint aujourd'hui nous semble légitimer l'effort de synthèse que constitue ce chapitre.

Un premier temps sera consacré à la **genèse** et au **développement** de la dynamique des systèmes. Cette partie établira en particulier les liens qui unissent la dynamique des systèmes à d'autres disciplines systémiques telles que la cybernétique. Ensuite, il s'agira de présenter les **concepts fondamentaux** et les **outils spécifiques** de cette méthodologie, c'est-à-dire les diagrammes causals, les diagrammes de Forrester, et les boucles de rétroaction. Il sera temps alors de présenter quelques modèles classiques de dynamique des systèmes avant, dans un dernier temps, de présenter les **applications** de la dynamique des systèmes à la modélisation du **système ville**.

### 2.1. Naissance et développement

Dans l'exercice consistant à tenter de donner un aperçu rapide, mais relativement complet de la naissance de la dynamique des systèmes, un certain nombre d'éléments déjà évoqués seront de nouveau sollicités. Au delà du caractère redondant d'une telle description, il semble bien que ce retour sur certains aspects du contexte dans lequel naît cette discipline soit indispensable. Elle permettra une mise en perspective de celle-ci par rapport à d'autres disciplines, et donc une mise en évidence de la **spécificité** de l'approche par la dynamique des systèmes.

Au lendemain de la deuxième Guerre Mondiale, les ordinateurs et les machines à calculer qui avaient joué dans le domaine militaire un rôle primordial, vont avoir dans le *civil* une influence considérable sur de multiples aspects du travail humain et, en particulier, sur le travail scientifique. C'est l'ère du développement d'une science dont l'objet est précisément le développement et la vulgarisation des techniques liées à l'ordinateur, connue sous le nom **Informatique**. À la même période, parallèlement à la naissance de l'informatique émerge une autre discipline connue sous le nom de **cybernétique**. Selon son fondateur, le mathématicien Wiener, cette science a pour objet l'étude de la communication et du contrôle, tant chez l'animal que chez la machine. La cybernétique établit l'existence de nombreuses **analogies** entre les processus auto

régulateurs des organismes vivants, le fonctionnement de dispositifs techniques déterminés (on se souvient des expériences sur les servomécanismes) et certaines formes de développement des systèmes sociaux. À un niveau plus abstrait, le biologiste von Bertalanffy fonde ce qu'il nomme la **théorie générale des systèmes**. Cette discipline, née de la volonté de généralisation des résultats de ses travaux dans le domaine de la biologie, a l'ambition de tirer profit du parallèle existant entre différentes disciplines scientifiques et de fournir les bases d'une **théorie intégrée de l'organisation et de la complexité**.

Nourri des concepts véhiculés par ces trois grandes disciplines, Jay Forrester, chercheur au MIT, va être à l'origine de la naissance de la **dynamique industrielle**, premier nom donné à ce qui deviendra la dynamique des systèmes. Au milieu des années 50, la compagnie Sprague Electric, qui fabrique des composants électroniques de haute précision, se trouve confrontée à un problème inattendu. En principe, ses clients étant des constructeurs d'appareillages électroniques destinés à des usages très spécialisés, la nature même du marché constitué par quelques gros clients aurait dû générer un flux de commandes relativement constant. Pourtant, vers le milieu des années 50, de fortes **oscillations** apparaissent dans les commandes. Ce phénomène n'est pas sans rappeler la *maladie* qui touchait les servomécanismes de Wiener. Une équipe du MIT, sous l'égide de Jay Forrester, est chargée d'étudier le problème. Les premières méthodes auxquelles cette équipe fait appel sont les techniques classiques de **recherche opérationnelle**. Mais très vite, Jay Forrester a l'intuition que cette voie n'est pas la bonne et que les résultats obtenus ne seront jamais satisfaisants. Cette intuition est basée sur l'importance qu'il découvre des structures faisant **rétroagir l'information** dans le fonctionnement des processus. En particulier, inspiré par la théorie des systèmes à rétroaction, il observe que l'existence simultanée de structures rétroactives et de délais dans les circuits d'information était à l'origine, du moins pour une grande partie, des oscillations. Ce concept fondamental qui établit qu'une **boucle de rétroaction avec retard** peut générer un phénomène oscillatoire, a permis d'expliquer le problème qui touchait la compagnie et de prendre des mesures correctrices. La structuration de ses idées et de sa méthode par Forrester, et la rencontre de succès importants au cours des années 50, marquent la naissance de la dynamique industrielle.

Vers le milieu des années 60, la dynamique industrielle a atteint un certain niveau de **maturité**, et sa méthodologie commence à être **généralisée** à l'étude d'autres types de problèmes. C'est ainsi que l'application de cette méthode à l'objet ville donne naissance à la **dynamique urbaine**. Dans les années 70, Forrester est sollicité par le Club de Rome<sup>5</sup> en vue de tenter d'appliquer sa méthode à l'étude du monde conçu comme un système dynamique. Le résultat de cette demande est la modèle du monde publié par Forrester en 1971 dans son livre *World Dynamics* et remanié ensuite par Meadows à l'occasion de son rapport au Club de Rome, connu sous l'intitulé « *Halte à la croissance ?* »<sup>6</sup> Ces applications à la ville et au monde rendent obsolète la dénomination de *dynamique industrielle* initialement donnée à ce qui devient la **dynamique des systèmes** dans les années 70.

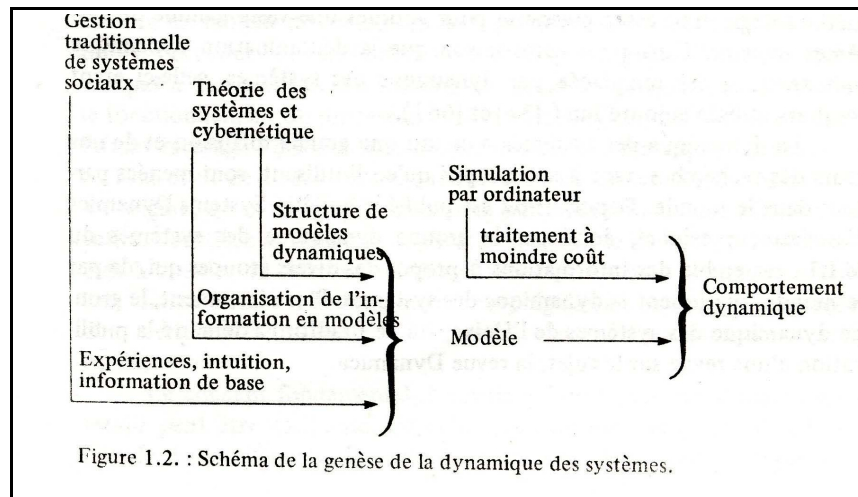
Pour conclure sur la genèse de la dynamique des systèmes, nous reproduisons le schéma développé par Aracil dans son ouvrage et qui a pour ambition de montrer les interrelations entre les concepts qui lui ont donné naissance.

---

5 Cette association internationale et non politique est fondée en 1968 à l'initiative d'Aurelio Peccei, un Italien membre du conseil d'administration de Fiat, et d'Alexander King, un grand scientifique et fonctionnaire écossais, ancien directeur scientifique de l'Organisation de coopération et de développement économiques. Il doit son nom au lieu de sa première réunion à Rome, à l'Academia dei Lincei. Elle réunit des scientifiques, des humanistes, des économistes, des professeurs, des fonctionnaires nationaux et internationaux ainsi que des industriels de 53 pays, préoccupés des problèmes complexes auxquels doivent faire face toutes les sociétés, tant industrialisées qu'en développement. Les membres du Club ont comme but de chercher des solutions pratiques aux problèmes planétaires. Son rôle demeure surtout de sensibiliser les hauts dirigeants aux problèmes planétaires actuels.

6 C'est la première étude importante soulignant les dangers écologiques de la croissance économique et démographique que connaît alors le monde. Par sa principale proposition, la croissance zéro, il a suscité de nombreuses controverses, et continue à inspirer aujourd'hui les partisans d'une alternative à l'ultra libéralisme économique.

Source : Aracil, 1984



## 2.2. Les concepts fondamentaux de la dynamique des systèmes

Dans cette partie, certains **concepts** déjà évoqués dans les chapitres précédents sont à nouveau abordés et approfondis. La volonté de mener avec la dynamique des systèmes le degré de modélisation le plus loin possible entraîne une exigence accrue de **rigueur** et de **formalisme**. Il s'agit donc dans les paragraphes qui suivent d'envisager les spécificités de la dynamique des systèmes ou *systémique de l'ingénieur* dans une perspective de formalisation et de quantification.

### 2.2.1. Notion de système dynamique

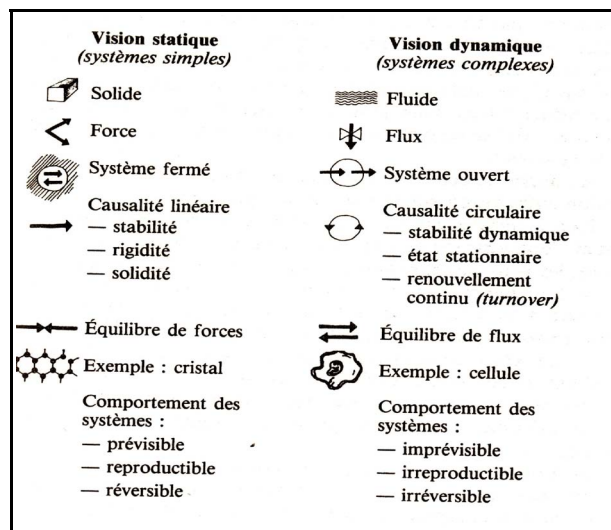
Dans un premier temps, il semble utile de revenir sur la notion de **système dynamique**. À l'opposition entre analytique et systémique développée précédemment, s'ajoute l'opposition entre vision statique et vision dynamique. La domination de la **vision statique** dans la pensée classique s'explique par les caractéristiques de cette dernière :

- tout d'abord, ses concepts ont été formés à l'image du *solide* : conservation de la forme, conservation du volume, effets des forces, relations spatiales, dureté et solidité ;
- ensuite, le temps irréversible, celui de la durée vécue, du non-déterminé, de l'aléatoire, n'est jamais pris en compte. T peut se transformer en -T sans que les phénomènes étudiés ne soient modifiés ;
- enfin, la seule forme d'explication des phénomènes est la causalité linéaire.

La pensée systémique contribue fortement au développement d'une **vision dynamique** où la notion de fluide remplace celle de solide, le mouvant remplace le permanent, souplesse et adaptabilité remplacent rigidité et stabilité. Les notions de flux et d'équilibre des flux s'ajoutent à celles de forces et d'équilibre des forces. La durée et l'irréversibilité entrent comme dimensions fondamentales dans la nature des phénomènes. La causalité devient circulaire et s'ouvre sur la notion de finalité. La dynamique des systèmes va faire éclater la vision statique des structures en intégrant le temps. Le tableau ci-près propose une synthèse de ce qui oppose ces deux visions, et par là, la pensée classique et la systémique au sens large.



## Visions statique et dynamique



Source : J. de Rosnay, 1975

### 2.2.2. Typologie des variables

La primauté de la vision dynamique en dynamique des systèmes induit une première **différenciation des variables** selon leur rapport au **temps** :

- les **variables d'état**, ou **variables de niveau**, encore appelées stocks, constituent un ensemble de variables dont l'évolution est significative pour l'étude du système. Les niveaux représentent des grandeurs qui accumulent les résultats d'actions prises dans le passé. L'état du système est représenté au moyen des variables de niveau. Un moyen simple pour les reconnaître est de mentalement arrêter l'écoulement du temps, les variables d'état se figent à une certaine valeur. Le choix des éléments qui sont représentés par des niveaux dans un modèle déterminé dépend du problème spécifique considéré. Dans les diagrammes de la dynamique des systèmes, les variables de niveau sont représentées sous la forme d'un simple rectangle ;
- les **variables de flux** déterminent les variations dans les niveaux du système. Elles caractérisent les actions décidées dans le système, lesquelles restent cumulées dans le niveau correspondant. Les variables de flux déterminent comment est convertie l'information disponible en action ou en comportement. De par leur nature, il s'agit de variables qui ne sont pas mesurables en soi, si ce n'est par les effets qu'elles produisent dans les niveaux avec lesquelles elles sont en relation. En d'autres termes, l'arrêt mental de l'écoulement du temps fait disparaître ces variables. La représentation schématisée de ces variables dépend selon les logiciels utilisés ;
- les **variables auxiliaires** représentent les étapes par lesquelles le calcul d'une variable de flux est décomposé à partir des valeurs prises par les variables de niveau. Elles sont représentées sous la forme de cercles. Les variables auxiliaires unissent les canaux d'information aux variables de niveau et de flux. En réalité, elles font partie des variables de flux, mais elles s'en distinguent dans la mesure où elles ont une interprétation réelle par elles-mêmes ou simplement parce qu'elles rendent plus facile la compréhension des équations de flux.

Il existe également une différenciation des variables en fonction de leur **position par rapport au système** tel que défini par le choix de ses frontières. Ainsi, les différents éléments ou variables intervenant dans le modèle peuvent être **exogènes** ou **endogènes**. Les variables exogènes servent à décrire les effets sur le système susceptibles d'être modifiés de l'extérieur de celui-ci. Elles représentent dans une certaine forme, l'environnement dans lequel le système est immergé. Les variables endogènes, elles, servent à caractériser tous les éléments dont le comportement est complètement déterminé par la structure du système, sans possibilité de modification directe de celui-ci.

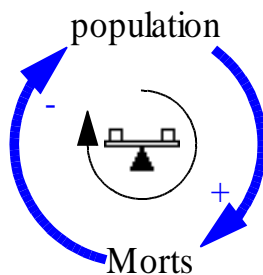
### 2.2.3. Les boucles de rétroaction

Lors de la construction d'un modèle de dynamique des systèmes, on commence par définir le système et ses frontières. Puis, on détermine les différentes variables qui entrent en jeu dans la compréhension du fonctionnement du système. Ensuite, il s'agit de caractériser ces variables et les relations qui lient ces différentes variables. Or, dans un système complexe, ces relations ne sont pas linéaires. Il existe de nombreuses **boucles de rétroaction** entre les variables, ces boucles constituant des chaînes fermées de relations causales. La **polarité** de ces boucles peut être de deux types : **négative** ou **positive**.

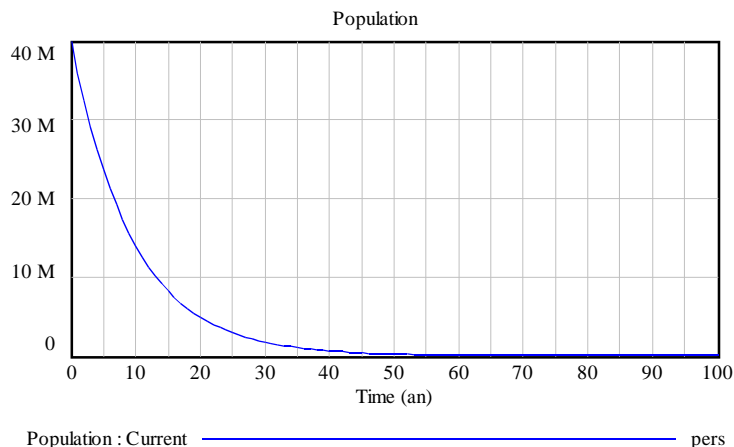
#### 2.2.3.1. Boucles négatives ou stabilisantes

Considérons dans un premier temps les **boucles de rétroaction négatives**. Ce sont celles dans lesquelles une variation sur un élément se transmet tout au long de la boucle de sorte qu'elle détermine une variation de signe **opposé** sur l'élément lui-même. Le comportement de ces boucles est donc caractérisé par une action auto-corrective. Une variation quelconque produite sur l'un des éléments de la boucle tend à s'annuler. Une telle boucle tend donc à amener de façon asymptotique la structure correspondante dans un état d'équilibre, d'où le nom de boucles **stabilisatrices**. Une boucle de rétroaction est négative si elle contient un nombre impair de relations négatives. On entend par là une relation entre deux éléments où une variation de la variable cause génère une variation en sens inverse de la variable effet.

*Ex de boucle négative :*



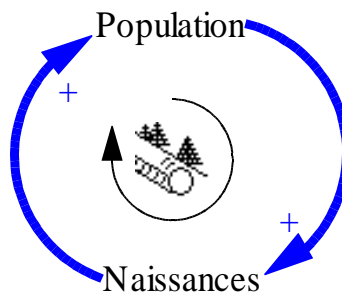
Le comportement d'une telle boucle en l'absence de délai sera :



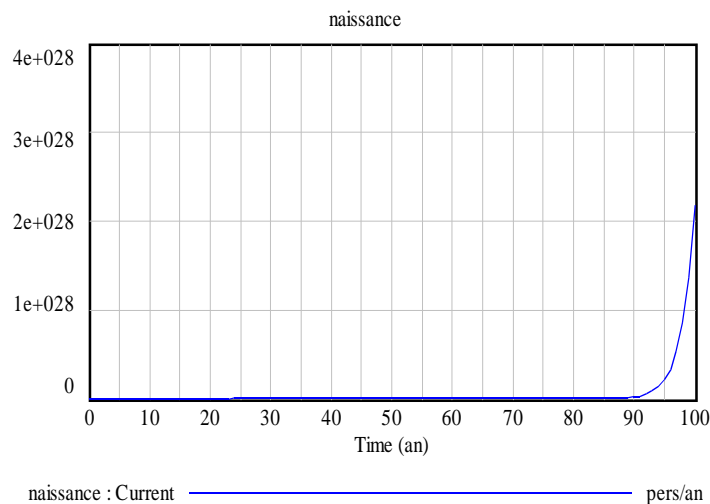
### 2.2.3.2. Boucles positives ou amplifiantes

Les **boucles de rétroaction à polarité positive** sont celles où la variation d'un élément se propage tout au long de la boucle de sorte que la variation initiale est renforcée, d'où le nom de boucles **amplifiantes**. L'appellation populaire de ce type de boucle est l'*effet boule de neige* ou *cercle vicieux*. Ce type de boucle a un comportement explosif (croissance exponentielle) ou implosif (décroissance de plus en plus rapide). La rétroaction est positive si elle contient un nombre pair de relations négatives ou uniquement des relations positives.

*Exemple de boucle positive :*

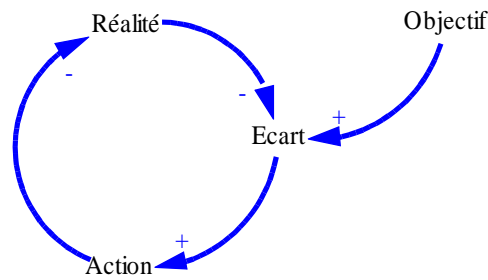


Le comportement général d'une telle boucle en l'absence de délai sera le suivant :



### 2.2.3.3. Notion d'objectif

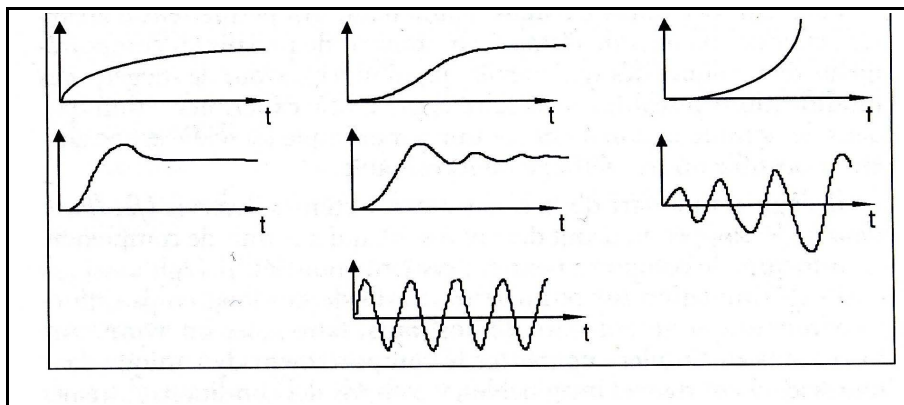
Une force agissant sur certaines variables qui caractérisent l'état du système résulte toujours de l'**écart** mesuré entre les objectifs à atteindre et la réalité telle qu'elle se présente. C'est cette différence entre objectif et réalité qui pousse à l'action, qui génère des forces ayant pour effet de modifier à terme la réalité. Cette **notion d'objectif** renvoie à celle plus large de finalité déjà évoquée dans le cadre de la systémique, dont elle constitue l'expression à la fois formalisée et quantifiée. Elle peut prendre les formes les plus diverses selon les domaines considérés : objectif en management, niveau d'aspiration en psychologie, etc.



#### 2.2.3.4. Interaction entre boucles

Dans tout modèle de dynamique des systèmes coexistent des boucles de rétroaction négative et des boucles de rétroaction positive. L'**interconnexion** de ces boucles peut donner lieu, selon qu'elles comportent des délais ou pas, aux comportements types suivants :

##### Différents comportements dynamiques



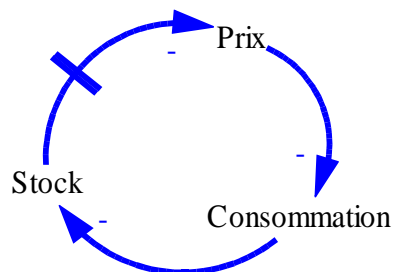
Source : Aracil, 1984

Ces comportements peuvent encore se compliquer si les boucles de rétroaction contiennent des **éléments non linéaires**. L'un des enseignements fondamentaux de la dynamique des systèmes tient en ce que le comportement temporel d'un système comprenant plusieurs boucles de rétroaction interconnectées ne peut se déduire aisément de l'analyse du comportement individuel de chacune des boucles. Il est important de prendre en compte l'existence de ces boucles et de leurs effets à long terme. En effet, s'il existe bien des boucles rapides dont nous sommes habitués à prévoir les effets immédiats, ce sont les **boucles lentes**, c'est-à-dire à grande constante de temps, à **long temps de réaction**, qui font un des intérêts majeurs de la dynamique des systèmes. Or, l'effet de ces boucles lentes ne se fait sentir que tardivement, mais d'autant plus sûrement que la cause, souvent ignorée ou mal perçue, a depuis longtemps disparu. La dynamique des systèmes peut être considérée dans cette optique comme une **démarche de perception et d'analyse des structures bouclées** que l'on trouve presque partout dans le monde qui nous entoure ou dans les éléments dont nous sommes constitués. Elle permet de comprendre les comportements de systèmes pouvant présenter jusqu'à 50 ou 100 boucles, même si toutes ces boucles ne sont pas actives en même temps au sein du système.

## 2.2.4. Retards et délais

Un facteur complexifiant dans le comportement d'un système est le **phénomène de délai**. La réalité qui nous environne est en effet irréductible à un ensemble de relations de nature purement comptable et instantanées. Il existe en effet un certain nombre de relations d'influence comportant presque toujours des délais représentant la **non-instantanéité des relations de cause à effet**. Un exemple relativement classique est celui de la boucle prix/consommation : ce n'est qu'au bout d'un certain temps qu'une variation de stock peut avoir un effet contraire sur le stock. Dans le domaine des transports, la baisse des tarifs n'a pas un effet instantané sur la pratique des usagers, le délai observé correspondant au temps nécessaire à la prise de conscience de la baisse des tarifs et à la modification effective des comportements. Ainsi suggérée, la notion de retard paraît évidente. Ce qui l'est moins, c'est la **combinaison de multiples délais** dans une structure complexe. Dans ces conditions, on comprendra que seule la simulation peut permettre de rendre compte de ces combinaisons et d'en appréhender pleinement les effets.

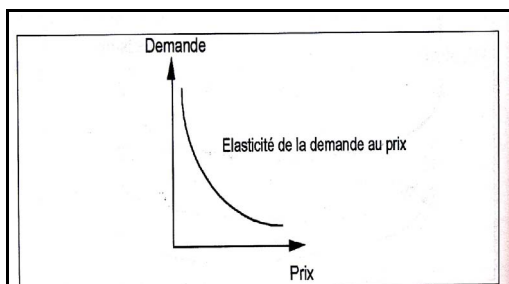
En matière de formalisation, on notera l'existence d'un délai sur une relation par la lettre d ou par une marque. Dans vensim par exemple, on fera figurer l'existence d'un délai sur la flèche d'interaction :



## 2.2.5. Non linéarité

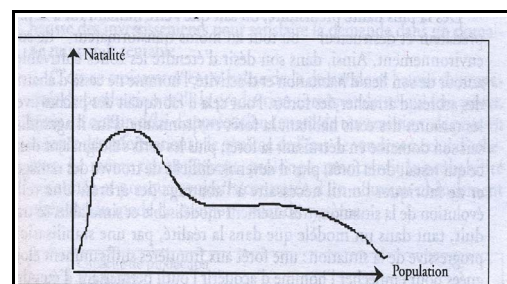
La complexité de certains systèmes est générée non seulement par l'existence de délais, mais elle peut l'être également par l'existence de **relations non linéaires** entre variables. Il est en effet très fréquent dans le monde qui nous entoure que les relations entre éléments soient toutes de proportionnalité stricte entre cause et effet. Quelques exemples simples sont fournis par les domaines économiques et démographiques. Ainsi le phénomène d'élasticité de la demande au prix en est-il une bonne illustration. De même de la courbe de natalité en fonction de la population.

### Élasticité de la demande au prix



Source : Karsky, Donnadiou, 2002

### Relation non linéaire entre natalité et population



Source : Karsky, Donnadiou, 2002

La présence de relations non linéaires ne facilite ni l'analyse formelle ni la compréhension du comportement temporel des structures étudiées.

### 2.2.6. Évolution structurelle

Par **évolution structurelle**, nous n'entendons pas apparition de relations causales ou structurelles nouvelles, ce qui correspond à une évolution imprévisible souvent inséparable de la notion de création, non prise en compte par la dynamique des systèmes. Par contre, si la création de structures nouvelles n'est pas encore du ressort de cette discipline, l'évolution des structures est parfaitement analysable et souvent prévisible. En effet, tout système complexe révèle à l'analyse un certain nombre de relations entre variables et de boucles de rétroaction **plus ou moins actives à un instant donné**. Autrement dit, selon l'évolution du système, selon l'état dans lequel il se trouve à un temps  $t$ , telle boucle pourra être active ou non, prédominante ou sans effet. Il en résulte une possibilité de changement, parfois radical, parfois très rapide, de comportement. En fait, ce changement structurel est souvent prévisible car contenu implicitement dans la structure. Un atout majeur de la dynamique des systèmes est de pouvoir aider à analyser, à prévoir, à comprendre les **changements structurels de comportement**.

On constate donc que contrairement à ce que l'on pourrait penser intuitivement, un modèle d'un système complexe, bien que réducteur de la réalité qu'il représente, est plus complexe que celle-ci. En effet, il représente non pas une réalité, mais une succession de **réalités potentielles et évolutives** qui, toutes implicitement contenues dans l'analyse, ne se manifestent et n'agissent qu'à tour de rôle, voire ne se manifestent jamais. Un modèle dynamique comporte non seulement la succession de toutes les réalités à venir mais aussi les nombreuses réalités potentielles qui ne surviendront peut-être jamais.

### 2.2.7. Synthèse

En conclusion de cette présentation des concepts généraux propres à la dynamique des systèmes, nous pouvons résumer ce qui caractérise cette démarche.

Tout d'abord, au delà d'une simple technique, au delà d'un outil de simulation, la dynamique des systèmes est également une **démarche** destinée à étudier le mouvement, le changement, l'évolution, plus généralement le comportement dynamique de systèmes complexes. Si elle n'est pas un outil informatique, cette démarche, inscrite dans la pratique, s'appuie sur un certain nombre d'**outils de modélisation** qui offrent au dynamicien des systèmes les moyens de procéder à des simulations dans le but d'analyser, de comprendre et de prévoir éventuellement le comportement des systèmes.

En dynamique des systèmes, la priorité est donnée à l'**analyse des facteurs de changement**, celui-ci pouvant être rapide ou lent. Il s'agit, à travers une approche continue, de déterminer le pourquoi, au delà de la description du mouvement.

La complexité de comportement d'un système, entendu par là son comportement souvent contre intuitif, est due essentiellement à l'**imbrication de multiples boucles de rétroaction**, dont l'influence est impossible à percevoir mentalement dès lors que la structure se complexifie un minimum. Par ailleurs, les notions de délai et de non linéarité viennent rendre le traitement intuitif, ou mental non seulement extrêmement difficile, mais dangereux.

## 2.3. Processus de modélisation dynamique

À présent que les principaux concepts en jeu dans tout modèle de dynamique des systèmes sont connus, il s'agit, dans cette partie, de détailler le **processus d'élaboration du modèle** en lui-même. La construction d'un modèle de dynamique des systèmes passe par une succession d'étapes au terme desquelles le dynamique des systèmes a conçu un modèle représentatif de la réalité complexe considérée et susceptible d'être simulé dans un but prospectif.

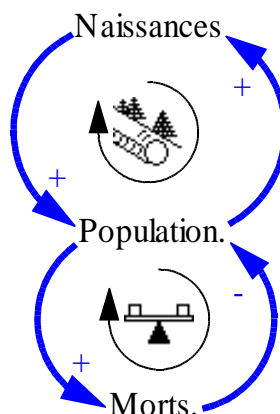
### 2.3.1. Le Modèle verbal

Dans une première étape qui correspond à la première partie de la **phase de conceptualisation**, l'observateur tente de se familiariser avec le problème complexe étudié. Pour cela, il a à sa disposition un certain nombre de ressources qui lui permettent de construire progressivement sa **représentation du problème**. C'est ainsi au cours de cette phase que la littérature sur le sujet sera parcourue, que la parole des experts l'aidera à se faire une opinion, et que sa propre expérience contribuera à une lecture personnelle de la réalité étudiée. Au cours de cette étape de **formulation verbale** du problème, il s'agit d'en définir avec précision les différents aspects, de les décrire et de poser les questions à résoudre de manière claire et précise. Au terme de cette étape, l'observateur s'est forgé sa propre représentation du problème complexe en même temps qu'il a commencé à le formuler.

### 2.3.2. Le diagramme causal

La seconde partie de la **phase de conceptualisation** consiste en l'étape de l'**analyse causale** du problème posé, qui doit aboutir à une **représentation ordonnée du système**. Il s'agit de mettre à plat l'ensemble des variables du système identifié précédemment. À ce stade de l'étude, l'exhaustivité n'est pas de rigueur, elle serait une perte de temps. Les variables et les influences manquantes apparaîtront tout au long de la conception. La construction des boucles représentant les relations entre les différentes variables doit répondre à quelques exigences. Tout d'abord, par souci de clarté, on préférera l'utilisation de plusieurs diagrammes dont le nombre de variables ne dépasse pas la vingtaine plutôt qu'un unique diagramme comportant plus de 200 variables. Ensuite, il faudra s'employer à tenter de reconnaître des **boucles significatives** du comportement du système en s'appuyant sur la connaissance préalable des structures simples de dynamique des systèmes. Enfin, la décomposition boucle par boucle, ou du moins la mise en évidence des boucles qui paraissent les plus importantes, sera d'une aide précieuse dans la compréhension du comportement du système.

En nous appuyant sur le modèle simpliste de la population, nous pouvons donner l'exemple de ce que serait le diagramme causal pour ce problème :



L'analyse causale permet donc de **structurer** un problème, mais aussi de le **décomposer** en sous-ensembles, en éléments simples destinés à être analysés individuellement. C'est une phase indispensable qui enrichit énormément la **perception globale** du système étudié, tout en générant une impression de plus en plus forte de complexité des phénomènes.

### 2.3.3. Phase de modélisation – Diagramme de Forrester

Après la phase qualitative de la construction du diagramme causal, vient la **phase de modélisation quantitative**. Il s'agit de formaliser le problème d'une manière qui soit adaptée à la simulation. En d'autres termes, dans cette étape, il s'agit de définir les équations différentielles qui peuvent représenter un système en mouvement.

#### 2.3.3.1. Principes généraux

Pour cela, il peut être utile de suivre les trois étapes suivantes :

- partant du diagramme causal, il faut **repérer les variables d'état**. Le critère de sélection découle de la spécificité d'une telle variable : lorsque le temps se « fige », la variable se fige elle aussi à une certaine valeur ;
- une fois repérées quelques variables d'accumulation, l'exhaustivité, ici encore, n'étant pas indispensable, il faut se poser la question des **flux** qui *remplissent* et *vident* ces variables de niveau. Pour reconnaître ces variables de flux, il suffit de repérer les variables qui agissent directement sur les variables de niveau, puis de figer le temps mentalement, elles doivent *disparaître* ;
- enfin, il s'agit dans un troisième temps de chercher de quoi dépendent ces flux, c'est-à-dire de quelles **variables d'information**, de quelles influences, de quelles contraintes.

Cette différenciation des différents éléments en variables d'état, de flux et d'information permet de créer une **dynamique d'évolution**. En procédant ainsi, on arrive a priori relativement rapidement à un modèle ordonné, mais aussi, et ceci ne doit pas nous effrayer, complexe. Cette phase de la modélisation est une des plus ardues, c'est la phase *fourmi* durant laquelle l'avancée se fait la plupart du temps à tâtons.

Il s'agit ensuite de **quantifier les relations** entre les différentes variables. Là encore, il peut être long et fastidieux de trouver les données nécessaires. La recherche des éléments qui participent à la génération du mouvement est inhabituelle et fait appel à des données qui souvent, ne sont pas connues, ne font pas partie des statistiques disponibles. En effet, la dynamique des systèmes complexes, dans sa recherche de causalité qui est une de ses raisons d'être, fait appel à des notions et des relations nouvelles qui nécessitent, plutôt que des données, des connaissances souvent difficiles à obtenir car représentant avant tout l'expérience des personnes compétentes, des connaissances se forgeant essentiellement au niveau de leur **modèle mental**.

#### 2.3.3.2. Formalisation et quantification

En dynamique des systèmes, la **phase de formalisation** correspond à la construction de ce que l'on appelle le diagramme de Forrester, à partir duquel on écrit les équations du modèle.



### 2.3.3.2.1. Formalisation des relations

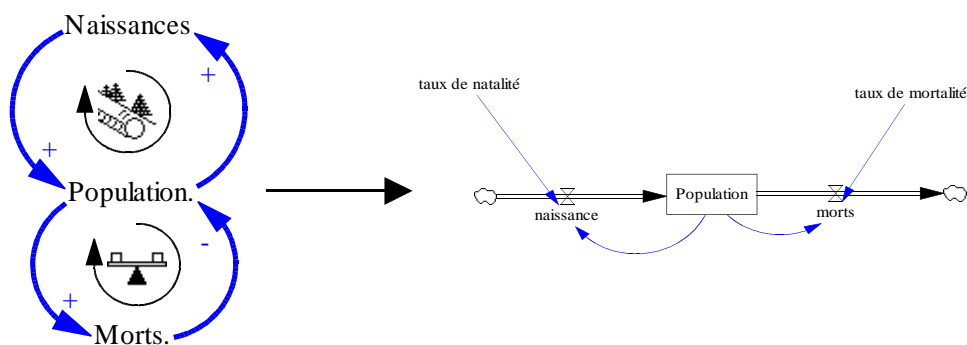
La flèche qui relie une variable à une autre symbolise une relation de cause à effet dans les diagrammes de Forrester. La formalisation de la relation pourra être de forme mathématique, logique et/ou probabiliste, et elle pourra être simple ou complexe. Cette formalisation sera valable tout au long de la phase de simulation. Lorsque la relation entre deux variables est complexe et non linéaire, on peut utiliser une formalisation sous forme graphique qui constitue elle-même une approximation de la ou des relations réelles qui peuvent lier entre elles deux variables. Une telle représentation, très facile à mettre en œuvre dans Vensim par exemple, présente des avantages non négligeables. Elle est en effet plus intuitive qu'une représentation mathématique complexe, ce qui est particulièrement utile lorsqu'il s'agit de demander à un expert du sujet d'évaluer et d'exprimer la relation entre deux variables.

Par ailleurs, elle est facilement modifiable, en particulier sur des segments limités. Enfin, d'un point de vue méthodologique, une représentation graphique rappelle mieux qu'une équation mathématique formelle et figée le fait qu'il ne s'agit en fait le plus souvent que d'une **approximation de la réalité**.

### 2.3.3.2.2. Quantification et paramétrage

En parallèle à la phase de formalisation, on procède à la **quantification** et au **paramétrage** du modèle. Il s'agit d'une part de figer le point de départ du modèle. Ce point de départ est déterminé par l'ensemble des valeurs initiales des variables d'accumulation du modèle qu'il s'agit de renseigner. D'autre part, tout modèle comprend un certain nombre de constantes auxquelles il faut donner une valeur a priori, cohérente et crédible, quitte à modifier ces valeurs lors des phases de calibrage et de validation.

En reprenant l'exemple de la population, le passage du diagramme causal se fait de la manière suivante. Ce passage s'accompagne de la quantification des relations entre les différents éléments. Par exemple, on exprime les naissances en fonction de la population et du taux de natalité par l'équation suivante : ***Naissance = Population \* taux de natalité***



## Simulation

Une fois le modèle construit et utilisable, on procède à son **test**, au moyen de **simulations** convenables. C'est la phase qui consiste à introduire la variable temps pour observer le comportement du modèle. Notons qu'il est possible de procéder tout au long de la construction du modèle à des **simulations partielles** qui peuvent se révéler d'une aide précieuse à la formalisation des relations du modèle, permettant de tester très rapidement telle ou telle formulation, et ce, dès le début de la phase de modélisation. Compte tenu de la complexité dynamique des systèmes étudiés, la validation des équations et des relations à l'aide du logiciel de simulation sera souvent beaucoup plus facile et rapide qu'une vérification théorique et abstraite des formulations mathématiques proposées. La **boucle Modélisation/Simulation** prend tout son sens et son utilité, et doit être appliquée aussi tôt que possible.

Durant cette phase de simulation, on analyse les **dynamiques possibles** en prenant soin de mettre en évidence les comportements imprévus, et contre intuitifs. L'**analyse de sensibilité** du système constitue un aspect fort important. C'est en vertu de cette analyse que l'on étudie la dépendance des conclusions extraites du modèle par rapport aux éventuelles variations que peuvent subir les valeurs des paramètres contenus dans le modèle. Après avoir jugé satisfaisantes les analyses de sensibilité et de consistance des hypothèses, on procède à l'élaboration et l'analyse de plusieurs scénarios, de prospective, celle où les modèles mentaux des experts et observateurs sont confrontés au modèle et se modifient. Enfin, c'est au cours de cette étape qu'il est possible de modifier la structure du modèle dans le but d'explorer les modifications structurelles potentielles destinées à générer les comportements désirés. On peut alors formuler un certain nombre de recommandations au sujet du **comportement futur** de la réalité complexe étudiée.

### 2.3.4. Calibrage et validation

Le **calibrage** constitue la phase la moins valorisante et la plus rébarbative du travail de conception, réalisation et exploitation d'un modèle. C'est la phase au cours de laquelle le modèle est peu à peu ajusté, les erreurs éliminées, les données modifiées et calées à mesure de l'ajustement du modèle à une réalité constatée ou supposée. Au delà de son caractère rébarbatif, cette phase est néanmoins indispensable. Elle permet en effet de comprendre de mieux en mieux le fonctionnement de l'outil, d'en constater certains comportements aberrants, bref, c'est la **phase d'appropriation** du système. Au cours de cette étape, le spécialiste en modélisation est seul face à son modèle dont il doit déceler les erreurs d'écriture, de conception, de cohérence. Il teste la cohérence du modèle non seulement dans les cas usuels de fonctionnement, mais aussi son comportement en situations extrêmes qui peuvent faire apparaître des erreurs cachées de modélisation.

La **validation**, au contraire, nécessite la présence et la **participation active des experts** du système étudié. C'est la phase au cours de laquelle ce dialogue avec les experts va permettre de valider ou d'invalidier le modèle. Le résultat de ce test doit beaucoup à la réaction des experts face au modèle. Le modèle sera accepté s'il s'avère capable à la fois de valider les intuitions des experts et la comportement passé du système, et si il permet de proposer une large variété de scénarios futurs.

Les phases de calibrage et de validation sont intrinsèquement liées, difficilement dissociables et se recouvrent au moins partiellement. Menées en parallèle, elles peuvent se faire de plusieurs manières. La première façon consiste en la **vérification expérimentale in situ**, quantitative ou qualitative. Cette méthode est à réserver plutôt aux systèmes physiques. Une seconde méthode consiste à confronter le modèle avec des **statistiques** existantes quand elles existent et à régler le modèle afin de minimiser les écarts entre résultats de simulation et séries historiques. L'absence de statistiques doit faire se tourner le concepteur du modèle vers les **avis d'experts** qui aident souvent à pallier à cette absence. Enfin, dans les cas où le modèle est très complexe, les experts seront impuissants à analyser a priori ce qui va se passer. Dans ces conditions, il faut que le concepteur s'appuie dès le début de la phase de modélisation sur la **simulation partielle**.

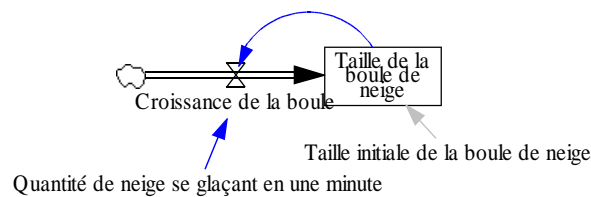
## 2.4. Quelques modèles classiques

Les éléments théoriques permettant le processus de conception d'un modèle de dynamique des systèmes est désormais connu. Dans cette partie, il s'agit de donner un premier aperçu de ce qu'est un modèle de dynamique des systèmes en nous appuyant sur la description de quelques modèles classiques et élémentaires.

### 2.4.1. Des modèles élémentaires

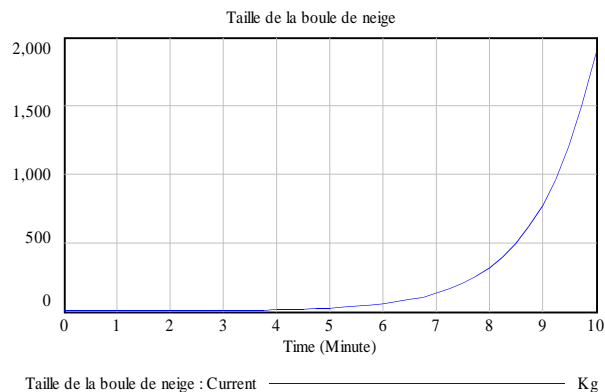
#### 2.4.1.1. Modèle de la boule de neige

Considérons comme premier modèle élémentaire le problème de la **boule de neige**. La finalité de ce modèle est d'explorer le temps que met une boule de neige à grossir en fonction de la quantité de neige se glaçant par minute et de la taille initiale de la boule. Le diagramme de Forrester de ce modèle est le suivant :



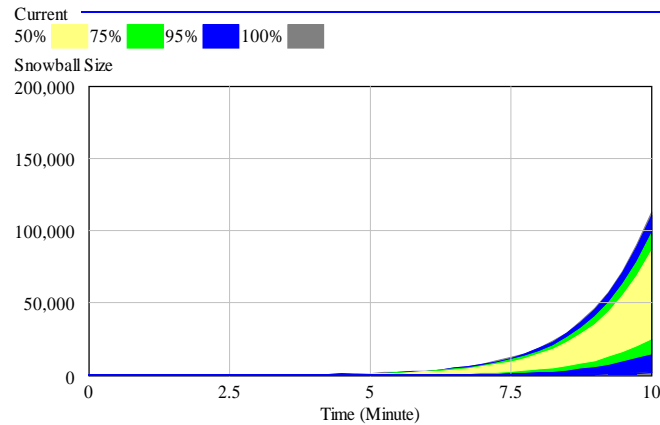
*Comportement :*

Plus la boule grossit, plus la croissance de la boule augmente, puisqu'elle est proportionnelle à la taille de la boule. C'est la raison pour laquelle on observe un **comportement exponentiel**.



*Test de sensibilité :*

Les fonctionnalités de Vensim nous permettent de faire des **tests de sensibilité**. On choisit de tester la sensibilité de la taille de la boule en fonction de sa taille initiale. Le graphique que nous fournit Vensim représente l'ensemble des courbes obtenues pour la taille de la boule de neige en fonction de sa taille initiale.

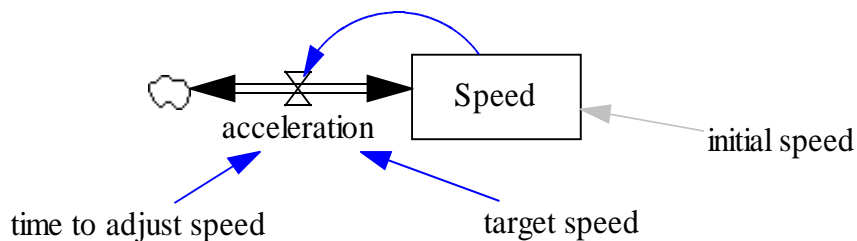


## 2.4.1.2. Mise en évidence de la notion d'objectif

Ce second modèle élémentaire a pour intérêt de mettre en évidence la **notion d'objectif** évoquée à plusieurs reprises. En fonction de l'écart entre la vitesse réelle et la vitesse à atteindre, il y a accélération pour, après un certain temps d'ajustement, combler l'écart entre ces deux vitesses. L'équation de l'accélération traduit ce comportement :

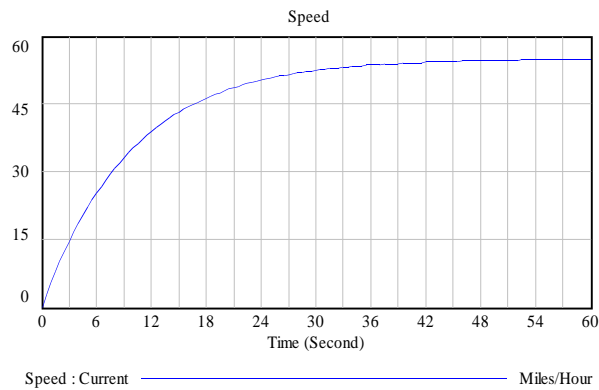
$$\text{Acceleration} = (\text{target speed} - \text{Speed}) / \text{time to adjust speed}$$

*Units: Miles/Hour/Second*



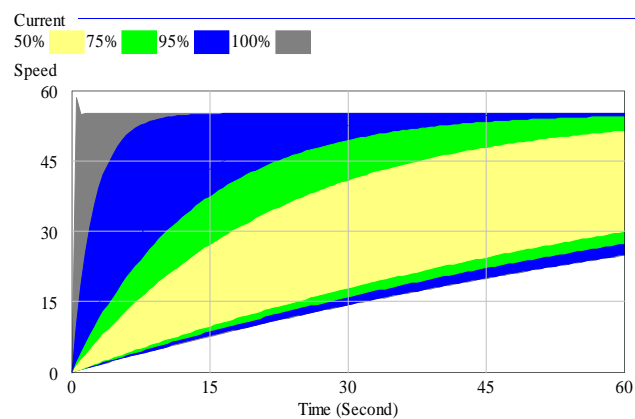
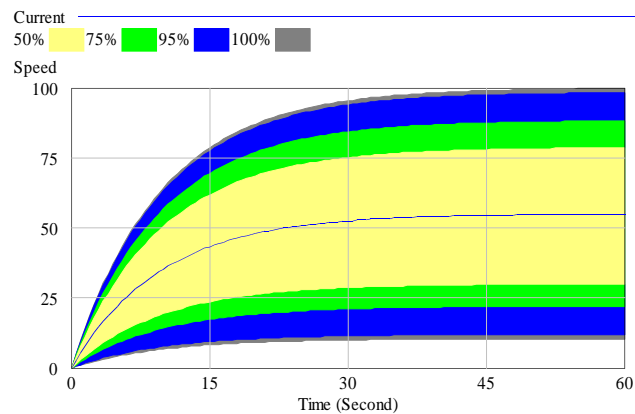
*Comportement :*

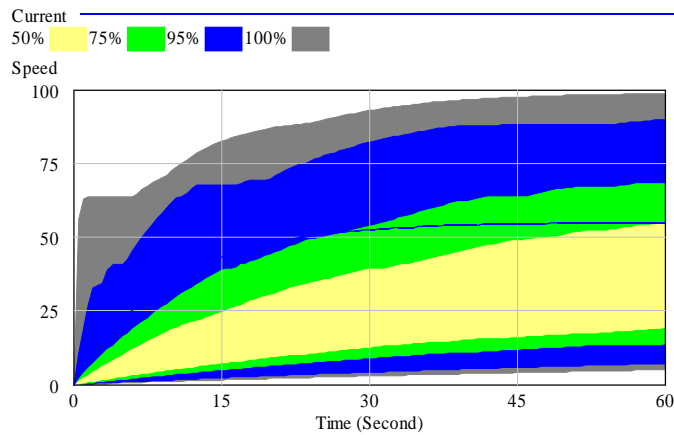
Le comportement est **asymptotique** vers un **but** : la vitesse visée.



*Tests de sensibilité :*

Là encore, on peut utiliser les fonctionnalités de Vensim pour effectuer des tests de sensibilité. Dans le premier cas, on teste la sensibilité de la vitesse en fonction de la variation du temps d'ajustement. Dans le second cas, on étudie l'influence de la variation de la valeur de la vitesse à atteindre. Enfin, dans un troisième test, on couple les deux premiers tests.

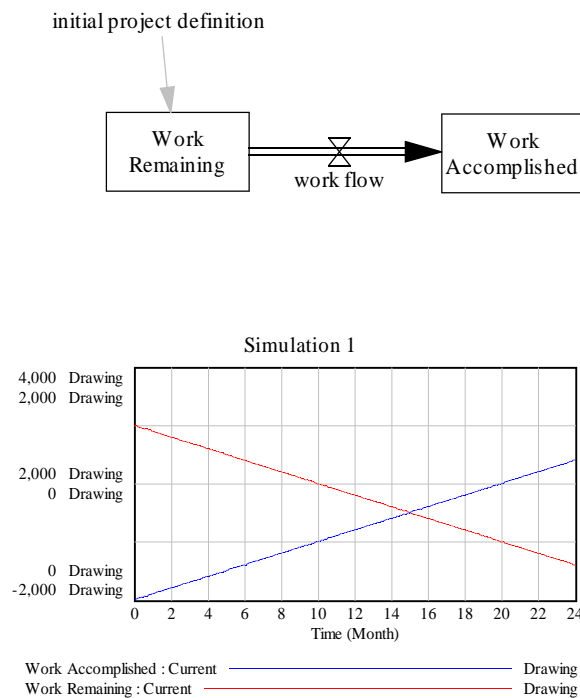




### 2.4.2. Du simple au complexe, des modèles pour *un* système.

Dans cette partie, il s'agit de montrer comment, en partant d'une représentation très simple du système étudié, le **processus de complexification progressif** permet de construire de manière intelligible un modèle plus complexe, mieux à même de représenter le système. L'intérêt de cet exercice, au delà du modèle lui-même et de la connaissance qu'il apporte du système considéré, est de mettre en évidence, en le décomposant, le processus d'élaboration d'un modèle un peu complexe de dynamique des systèmes.

Un modèle assez classique en dynamique des systèmes, le modèle du **projet**, se prête relativement bien à cet exercice. Commençons donc notre exploration par un premier modèle élémentaire de ce système :

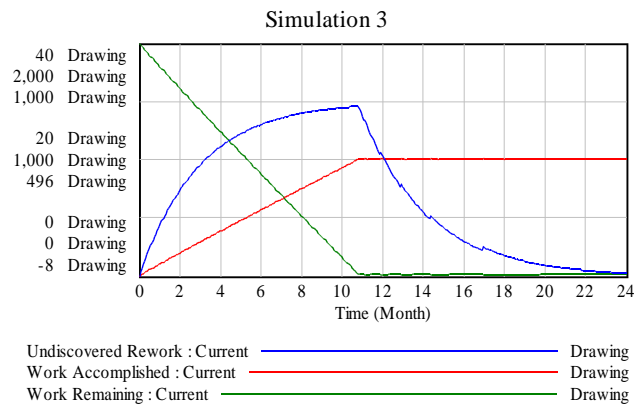
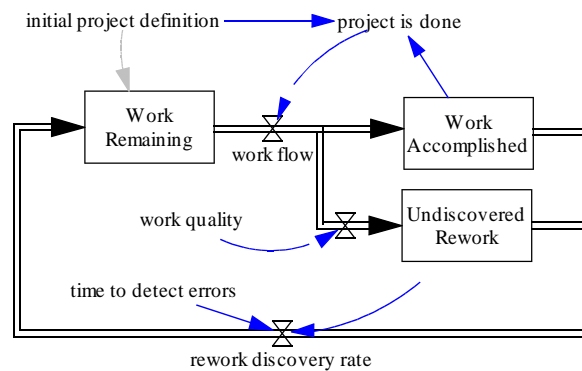


Ce premier modèle illustre la manière dont, à partir d'une somme de travail initiale, l'accomplissement de la tâche permet de *vider* le réservoir de travail restant tout en remplissant le réservoir de travail accompli.

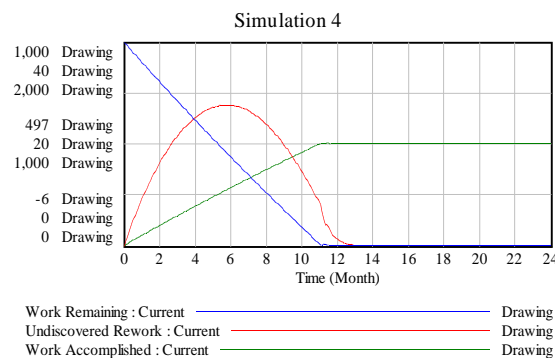
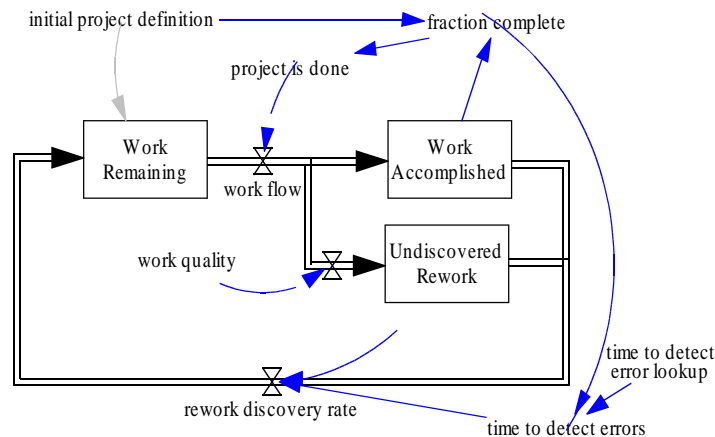
*Première complexification :*

Cette première complexification consiste en l'ajout d'une **boucle d'information/décision** qui permet de prendre en compte dans le modèle la caractéristique finie de la somme de travail à accomplir. Dans ces conditions, on observe sur le graphique qu'au bout de dix mois, tout le travail a été accompli.

*Deuxième complexification :*



Cette phase de complexification correspond à la prise en compte de l'**existence d'erreurs** au cours de l'accomplissement du travail. Ces erreurs, découvertes avec un certain délai, nécessitent d'être retravaillées. Ce phénomène se traduit sur le graphique associé par l'existence d'une courbe qui montre l'évolution du travail *mal fait* à refaire, et par un temps plus long d'accomplissement du travail, qui vaut un peu plus de dix mois.

*Troisième complexification :*

Cette phase correspond à l'**affinement du temps de détection des erreurs** : on introduit dans le modèle une fonction non linéaire qui associe un temps de détection à la fraction de travail accomplie. Plus le travail déjà accompli est important, et plus le temps de détection des erreurs est court.

On pourrait aller plus loin encore dans le processus de complexification, en prenant en compte le calendrier prévisionnel par exemple, puis en considérant la main d'œuvre et la productivité, en prenant en compte la fatigue des employés, etc. Nous en resterons là pour l'instant. Cet exemple montre assez bien l'intérêt de l'outil dynamique des systèmes dans la modélisation de systèmes qui font intervenir des fonctions non linéaires.

## 2.5. La ville comme système complexe objet de la dynamique des systèmes

La ville peut être considérée comme un système complexe, ensemble d'éléments en interaction les uns avec les autres, susceptible de faire l'objet d'une approche systémique. Les travaux de Joël Rosnay et de Thierry Vilmin, entre autres, sont autant de tentatives d'application de la méthodologie systémique à cet objet. Néanmoins, les limites d'une seule approche qualitative ont été évoquées. Si l'approche systémique permet à l'observateur de révéler des aspects souvent ignorés jusque là, et contribue par là à enrichir fondamentalement la connaissance sur le sujet, elle se révèle bien impuissante dès lors qu'il s'agit pour l'observateur de prévoir le comportement du sys-



tème, et de résoudre les problèmes identifiés. C'est cette conscience de la nécessité du passage au quantitatif qui a conduit certains systémiciens à investir dans le développement de méthodes opérationnelles, telle la dynamique des systèmes. L'**urbain**, dans cette entreprise, est apparu comme un **champ d'expérimentation** particulièrement intéressant et fécond.

### 2.5.1. La dynamique urbaine de Forrester

Ainsi, l'inventeur de la dynamique des systèmes, Jay Forrester, l'a d'abord appliquée, en même temps qu'il en définissait les concepts, au domaine de l'entreprise, d'où la dénomination originelle de dynamique industrielle. Cette discipline depuis ses débuts, vers la fin des années 50, est essentiellement utilisée pour étudier des problèmes complexes liés à la gestion de manière générale. Au milieu des années 60, conscient de l'enjeu de tester sa méthode dans d'autres domaines, Jay Forrester s'emploie à élargir le champ de ses applications à un thème éloigné de ses préoccupations antérieures. Cette volonté se traduit par l'élaboration d'un modèle de comportement dynamique d'une **aire urbaine**, connu sous le nom de dynamique urbaine.

#### 2.5.1.1. Introduction

La publication en 1969 de *Urban Dynamics* de Jay Forrester, synthèse de ses travaux, rompt délibérément avec les tentatives d'élaboration de modèles explicatifs généraux de la croissance urbaine qui s'étaient multipliés durant les années 60 aux États Unis. Son modèle, doté d'un langage informatique nouveau, sous-tendu par la théorie générale des systèmes, est tourné vers l'**exploration à long terme** de l'avenir des grandes villes et l'étude des **conséquences lointaines des décisions de politique urbaine**. Sitôt publié, l'ouvrage de Forrester devait susciter une avalanche de critiques parfois contradictoires. La complexité de son modèle, ou au contraire son caractère simpliste lui sont reprochés tout à la fois. L'horizon de son modèle est jugé trop long. La méthodologie sur laquelle repose son travail de conception est contestée. Sont également critiqués dans ce modèle des relations causales mal identifiées, des paramètres arbitraires sans correspondance avec la réalité, l'absence de considération des problèmes de l'espace intra-urbain, ou encore la simplification presque caricaturale des rapports sociaux dans la ville. Toutes ces critiques avaient d'ailleurs été prévues par Jay Forrester, convaincu de la difficulté d'admettre des conclusions dont le caractère contre intuitif rend d'autant plus difficile l'acceptation. Dix ans plus tard, les lectures de cet ouvrage ne suscitent plus des critiques aussi vives, le temps ayant fait son œuvre. Dans un contexte plus serein et propice à la réflexion, le véritable apport de Forrester aux études urbaines apparaît mieux et suscite même intérêt et effort d'adaptation et de transposition aux villes françaises.

Le modèle de dynamique urbaine est destiné à la simulation du **développement à très long terme** d'une grande ville, à explorer les conséquences lointaines de politiques urbaines alternatives. Sur le premier point, les projections ont été effectuées à 250 ans et conduisent généralement à des positions d'équilibre stable après des phases de croissance et de déclin des principales grandeurs économiques. Mais les limites du modèle – qui concernent pour la plupart la question de la **spatialisation** – rendent difficile l'évaluation de telles conclusions. Sur le deuxième point, l'apport de Forrester est intéressant. L'auteur nous montre que les politiques classiques échouent le plus souvent et aggravent même la situation initiale. Il analyse ainsi les effets de huit politiques de rénovation urbaine. Il tire deux conclusions de son étude sur le système urbain : c'est un système **contre intuitif**, et c'est un système extrêmement robuste, peu sensible à des modifications dans les valeurs des principaux paramètres ou des variables d'entrée du modèle. La réaction aux simulations de politiques urbaines est **lente et évolutive**.

### 2.5.1.2. Démarche

Le livre de Forrester prit naissance lorsque ses travaux sur la dynamique industrielle convergèrent avec l'effort de John Collins, ancien maire de Boston et alors professeur au MIT, pour attirer l'attention sur les problèmes urbains liés au vieillissement des villes. L'enthousiasme de ce dernier à continuer à analyser et à perfectionner les processus urbains conduisirent Jay Forrester à tenter de structurer et de modéliser, avec l'aide de ce professeur, la dynamique du déclin et de la renaissance des villes. La méthodologie que Forrester choisit de mettre en œuvre s'appuie non pas sur la littérature urbaine, ce qui lui sera lourdement reproché, mais sur l'**expérience pratique** en terme d'affaires urbaines de certaines personnes. De nombreuses discussions informelles avec ces **experts** fournirent à Forrester la matière, entre détails et généralités, qui révéla peu à peu la structure de système qui établissait un rapport entre les composantes du système et son comportement.

### 2.5.1.3. Structure du modèle urbain de Forrester

Le **modèle** auquel Forrester aboutit est particulièrement **complexe**. Dans cette partie, nous nous proposons d'en présenter un résumé qui permette au lecteur d'en comprendre la portée et la signification et peut-être, lui donne l'envie de se plonger plus avant dans l'étude de ce modèle par la lecture de l'ouvrage de Forrester.

Le modèle de dynamique urbaine de Forrester traite des **processus de croissance** des grandes aires urbaines, considérées comme des systèmes dans lesquels **trois sous systèmes : l'industrie, le logement et la population** interagissent. Le modèle suppose que l'on parte d'une aire de croissance, fixe et limitée, qui se trouve initialement vide. Comme tout modèle de dynamique des systèmes, celui de Forrester contient en germe la vision subjective de son auteur, sa lecture de la structure urbaine et des relations internes. Ainsi le modèle ne retient finalement, parmi de nombreuses alternatives possibles, qu'un jeu de variables jugé pertinent pour répondre aux questions relatives à la croissance d'une aire urbaine, à son vieillissement et à sa possible réactivation. Dans le modèle de Forrester, deux concepts fondamentaux sous-jacents traduisent cette **orientation** : celui d'**attractivité** et celui d'**interconnexion** entre les problèmes.

#### 2.5.1.3.1. Frontières du système

Dans son modèle de dynamique urbaine, Forrester considère que les limites sont établies par une frontière immuable séparant l'aire urbaine de l'environnement dans lequel elle se trouve insérée. Avec l'environnement, l'aire urbaine ne maintient que des relations unidirectionnelles, non bouclées, contrairement à ce qui se passe à l'intérieur de l'aire urbaine. L'**environnement** est supposé **illimité** de sorte que l'aire urbaine ne l'affecte pas de manière significative. À l'intérieur de l'aire urbaine ont lieu des interactions entre les différentes classes de populations, les logements qu'elles occupent et les industries fournissant des postes de travail. L'analyse du comportement dynamique généré par ces interactions constitue l'objectif du modèle.

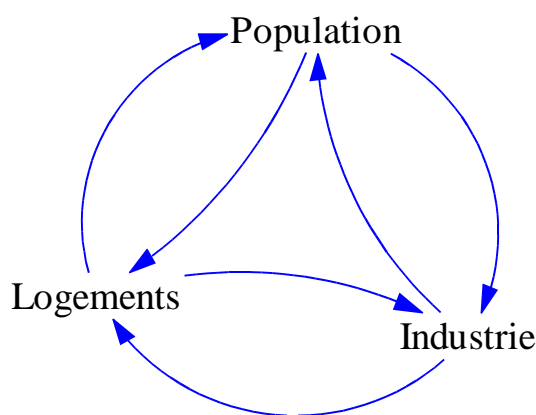
#### 2.5.1.3.2. L'attractivité relative

L'un des concepts fondamentaux qu'introduit le modèle urbain de Forrester est celui d'**attractivité relative**. L'aire urbaine exerce une attraction ou une répulsion sur les entreprises et les différentes catégories sociales de la population. L'attraction relative détermine le flux net qui pénètre dans l'aire. Ce principe d'attractivité relative est primordial pour comprendre les flux de population. Toutes les caractéristiques qui rendent attrayante une aire urbaine se combinent

pour déterminer l'immigration vers cette aire. Toutefois, toutes les composantes de l'attraction décroissent lorsque la population s'accroît. D'où une première conclusion intéressante : dans les conditions d'équilibre de population, toutes les aires doivent être également attrayantes pour une certaine classe de population, car dans le cas contraire, des mouvements migratoires devraient avoir lieu, perturbant l'équilibre.

#### 2.5.1.3.3. Les trois sous systèmes du modèle

Le modèle de Forrester divise le système urbain en trois sous systèmes : l'industrie, le logement, la population.



Chacun de ces trois sous systèmes étant constitué de trois variables de niveau, ce qui donne lieu à neuf variables de niveaux.

L'**industrie** est subdivisée en trois niveaux correspondant à peu près à l'âge des entreprises :

- les *entreprises nouvelles* NE (New Enterprise) qui sont caractérisées par leur dynamisme économique, par une main d'œuvre hautement qualifiée et par un grand nombre de postes de travail ;
- les *entreprises mûres* MB (Mature Business) qui proviennent du vieillissement des nouvelles entreprises ;
- les *vieilles entreprises* ou *entreprises en déclin* DI (Declining Industry) qui sont caractérisées par un nombre de postes de travail réduit et par un bas niveau de qualification et qui sont vouées à la disparition.

Les **logements** sont subdivisés en trois catégories assorties à peu près aux trois classes de population :

- les *logements pour les employés* PH (Premium Housing) ;
- les *logements pour les ouvriers* WH (Worker Housing) ;
- les *logements pour les ouvriers non qualifiés* UH (Underemployed Housing)

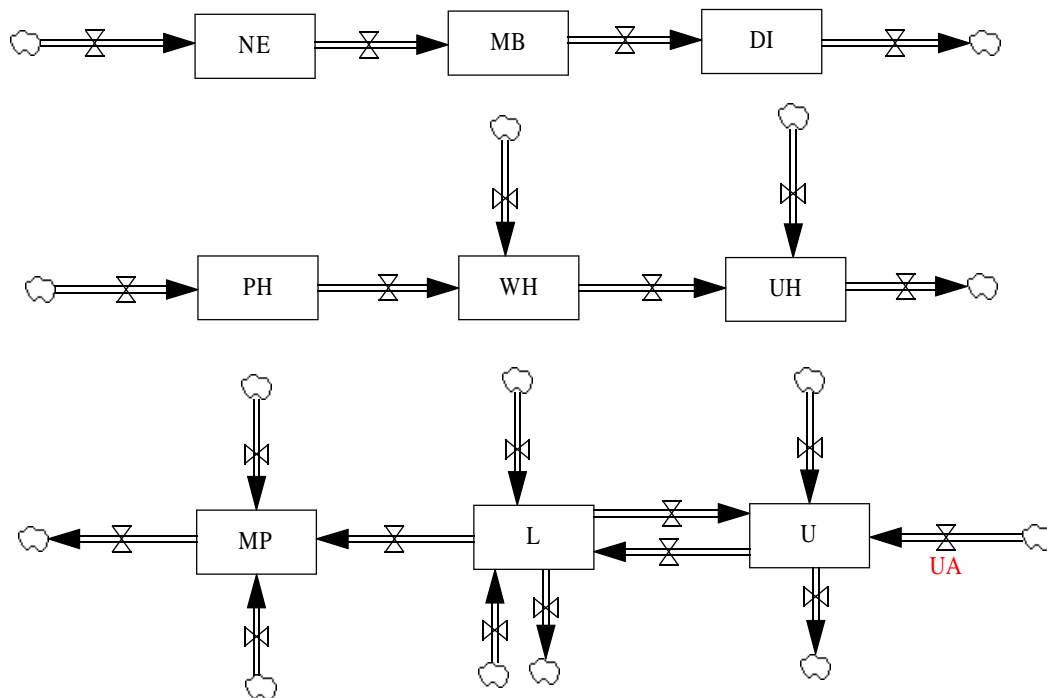
Le passage d'une catégorie à l'autre s'effectue suivant un **processus de vieillissement** analogue à celui des entreprises. On considère par ailleurs la construction de nouveaux logements dans chacune des trois catégories.

La **population** est divisée en trois classes :

- les *professions libérales et les cadres* **MP** (Managerial-Professional) ;
- les *ouvriers qualifiés* **L** (Labor) ;
- les *ouvriers non qualifiés* **U** (Underemployed). Cette catégorie englobe les ouvriers non qualifiés et ceux qui ne travaillent que de manière occasionnelle ou en activités économiques marginales.

À chacune de ces classes de population correspondent un taux de croissance naturel, un taux de migration *normal* et un taux de mobilité interclasses. C'est à partir de ces taux que sont déterminés les flux responsables de l'évolution.

Les secteurs ou sous systèmes industrie et logement sont traduits numériquement et respectivement en **unités de production** et en **unités de logements** qui correspondent à une certaine surface construite. Chaque unité de production, suivant sa catégorie, donne lieu à un nombre d'emplois pour chacune des classes de population. De même, chaque unité de logement en fonction de sa catégorie est habitée dans des conditions normales, par un nombre de personnes déterminé de la classe de population correspondante.



Les neuf niveaux du modèle de dynamique urbaine

Source : J. Forrester, 1979

#### 2.5.1.3.4. Quantification – Calcul d'un flux

Sans entrer dans le détail ni des calculs, ni des interconnexions ici, nous proposons de présenter de manière simplifiée la manière dont un flux est calculé. On en restera essentiellement au niveau de la *démarche*. Prenons comme exemple celui du calcul du **flux d'arrivée de la population sans qualification** dans l'aire urbaine, noté **UA** et figurant en rouge sur le diagramme précédent et sur celui qui suit. Nous vous invitons désormais à (essayer de) suivre notre raisonnement sur le diagramme suivant.

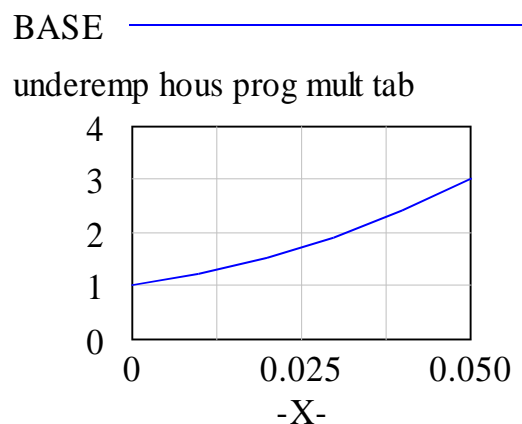
Celui-ci montre comment l'arrivée de la population sans qualification *underemployed arrivals* dépend d'un coefficient d'attractivité « AMM » (Attract Migr Mult) qui est fonction de l'aire urbaine à un instant considéré. Ce coefficient influe sur le flux d'arrivée avec un certain retard dû au retard de perception « AMMPT » (Attract Migr Mult Perc table) des conditions de l'aire urbaine par l'environnement. Le coefficient AMM est calculé à partir des variables auxiliaires suivantes :

- UAMM (underemp arr mob mult) qui mesure la possibilité de promotion professionnelle de la population sans qualification vers des postes d'ouvriers qualifiés ;
- UHM (underemp housing mult) qui mesure la disponibilité de logements pour la population sans qualification ;
- PEM (public expenditure mult) qui mesure les dépenses publiques par rapport au nombre d'habitants ;
- UJM (underemp job mult) qui correspond au nombre d'emplois pour la population sans qualification par rapport au volume total de celle-ci ;
- UHPM (underemp hous prog mult) mesurant l'existence éventuelle d'un plan de construction de logements bon marché.

On obtient alors le coefficient d'attractivité AMM en multipliant l'ensemble de ces cinq variables auxiliaires dont on comprend dès lors la dénomination de **facteurs multiplicateurs**.

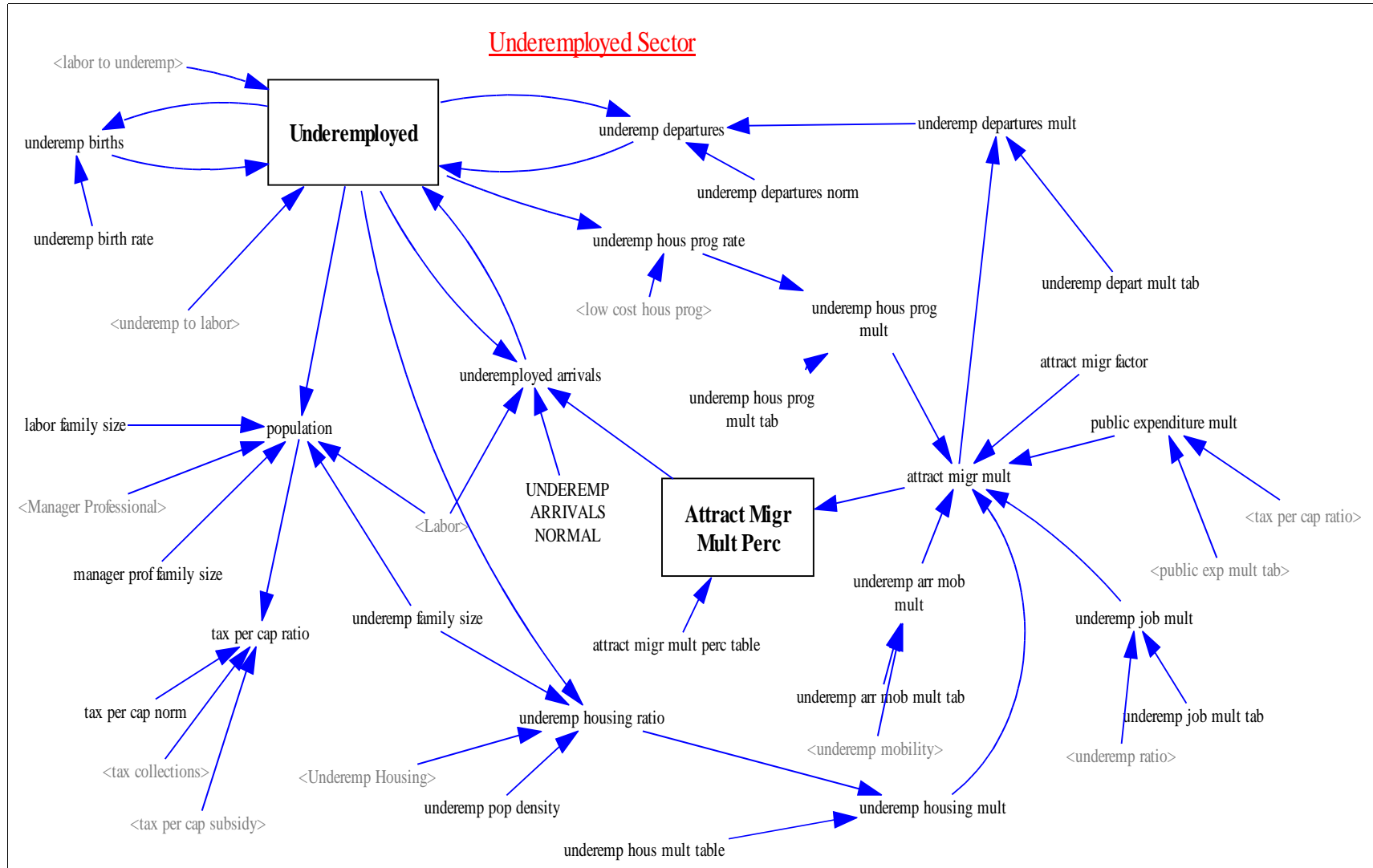
**Chacune de ces variables auxiliaires est déterminée à l'aide de relations non linéaires à partir des autres variables auxiliaires. Ces variables auxiliaires sont déterminées de manière analogue jusqu'à ce qu'on trouve dans le diagramme un niveau.** Tout au long du processus d'élaboration du modèle, la détermination des flux suit une règle analogue à celle que l'on vient de décrire.

Comme on vient de le voir, des **délais de perception** interviennent. Ces délais sont souvent représentés sous forme de fonctions non linéaires (des tables) telles que celle-ci :



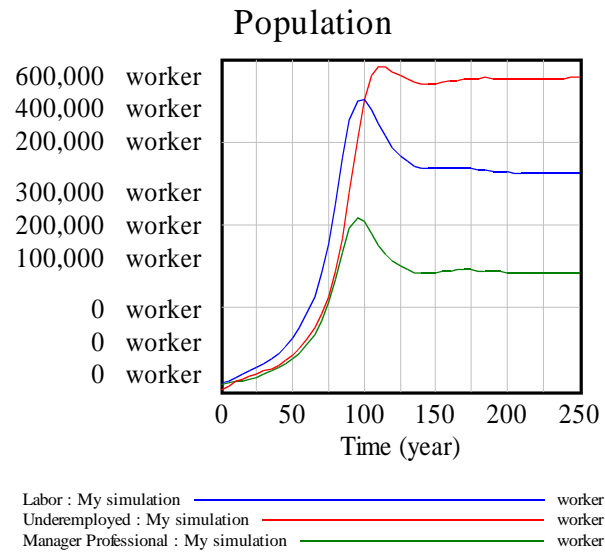
Pour présenter le modèle dans son ensemble, il faut présenter chacune de ces tables (53 dans le modèle de Forrester) fournissant les **relations non linéaires** du modèle. La présentation de ces tables ainsi que leur justification est excessivement importante, mais demande énormément de temps. On ne poussera donc pas la présentation jusqu'à ce niveau de détail. Nous invitons ceux que cela intéresse à se reporter au livre de Forrester pour une explication exhaustive de son modèle.

## Secteur du chômage



Source : J. Forrester, 1979





Tous les niveaux suivent approximativement le même comportement : un **accroissement** jusqu'à atteindre un sommet, pour ensuite **décroître** jusqu'au moment où, après une légère **oscillation**, la valeur de niveau est **stabilisée**. On distingue donc deux étapes : une **étape de croissance** et stagnation et une **étape d'équilibre**.

#### 2.5.1.4.1. Croissance et stagnation

Initialement, on observe une période de croissance accélérée correspondant à une **domination des boucles positives** apparaissant dans la structure du modèle. Cette phase est caractérisée par l'importance de l'immigration, l'expansion économique, la construction de logements et d'usines, le plein emploi et l'attractivité de l'aire urbaine par rapport à l'extérieur ainsi que par un taux d'impôts faible. Cette période recouvre à peu près les cent premières années. Ce temps écoulé, la quasi totalité de l'occupation du sol urbain a été réalisée. Les nouvelles constructions commencent dès lors à **décroître** et le système urbain stagne à un niveau élevé de logements en mauvais état et une industrie en déclin. Alors, une **période de récession** apparaît comme résultat du vieillissement de la structure économique et de la paralysie de la construction par manque de surfaces libres. Cette récession s'exprime par une dégradation des conditions de logements et d'emploi, et par un accroissement de l'émigration. Dès lors, les niveaux associés aux ouvriers non qualifiés, aux logements en mauvais état et à l'industrie en déclin augmentent relativement.

Le passage de la phase de croissance à la **phase de régression** indique que dans le modèle, les **boucles de rétroaction négatives** sont devenues **dominantes** par rapport aux boucles positives.

#### 2.5.1.4.2. Équilibre

Après avoir atteint un minimum, l'aire urbaine entre dans sa **phase d'équilibre** à partir de la deux centième année. Cet équilibre n'a de sens que par rapport à l'environnement entourant l'aire urbaine, ce qui n'exclut pas le fait que des évolutions se produisent parallèlement dans l'environnement et le système urbain. L'état d'équilibre est caractérisé par le fait que formellement, les flux d'entrée et les flux de sortie se compensent. En ce qui concerne le logement par exemple, les nouvelles constructions remplacent exclusivement les démolitions.



L'état de l'aire urbaine est caractérisée, une fois l'équilibre atteint, par des logements vieux, une industrie vieillie, une population élevée d'ouvriers non qualifiés, un excédent de logements, des taux d'impôts élevés et un chômage important chez les ouvriers non qualifiés. Pour toutes ces raisons les conditions d'équilibre sont caractéristiques d'un **état économique et social défavorable**.

C'est la raison pour laquelle ce modèle a été utilisé pour tester des scénarios simulant la mise en œuvre de différentes **politiques urbaines**. La politique qui semble la plus efficace consiste en un plan prévoyant aussi bien la démolition de logements vétustes que le lancement d'entreprises nouvelles. Les résultats montrent un développement et un rajeunissement de l'industrie, un accroissement de la population totale, une amélioration sensible des conditions de travail pour la population sans qualification et enfin une diminution sensible des impôts.

#### 2.5.1.5. Conclusion

Pour conclure, le modèle de dynamique urbaine de Forrester a comme seule prétention de constituer un début à l'application de la dynamique des systèmes aux problèmes urbains. En aucune manière il ne prétend que les résultats obtenus sont définitifs.

Il faut rappeler par ailleurs que ces résultats dérivent des hypothèses sur lesquelles le modèle a été construit, à savoir que celles-ci se rapportent à la réalité américaine, et plus spécifiquement, aux conditions de la **frange nord-est des États Unis**. Une caractéristique qui conditionne beaucoup ces conclusions repose sur le fait que l'aire urbaine est considérée comme **fixe et limitée**. En d'autres termes, le modèle ne prévoit pas l'extension territoriale de cette aire sous certaines contraintes. Son application à des villes européennes demande donc quelques modifications auxquelles s'est attelé le DERA de Toulouse à travers son application du modèle de Forrester à la ville moyenne de Decazeville.

#### 2.5.2. Le modèle de Decazeville

Dans ce paragraphe, il ne s'agit pas de présenter le **modèle de Decazeville** en détail, encore moins de procéder à des simulations sur ce modèle tel que nous avons pu le faire sur celui de Forrester. Nous indiquerons simplement les raisons de la nécessité de **modification** du modèle de dynamique urbaine, et les grandes lignes de cette modification.

Les différences fondamentales existant entre les villes américaines et les villes européennes justifient le besoin de modifier le modèle de Forrester pour l'adapter au contexte français. Tout d'abord, dans le modèle de Forrester, la croissance urbaine est limitée par une limite naturelle pour l'occupation de la surface libre. Ces conditions se présentent rarement dans les villes européennes dont l'apparition et le développement sont fondés normalement sur l'existence de ressources naturelles ou sur des conditions géographiques et économiques favorables. C'est le cas de Decazeville, dont l'évolution a été intimement liée à l'**exploitation du charbon** en France.

Par ailleurs, dans le modèle de Forrester, le secteur du logement a une grande influence parce qu'il occupe des terrains qui sont en concurrence avec l'industrie. La disponibilité de logements conditionne dans une large mesure les mouvements migratoires des différentes classes sociales, et dans une mesure plus grande, la possibilité de trouver un emploi. Ce dernier facteur étant considéré comme prépondérant en Europe. Dans le modèle de Decazeville, un seul niveau est consacré au secteur logement.

Enfin, dans le modèle de Forrester, une grande importance est attachée au secteur des impôts, très importants au niveau urbain. Dans la situation française, la contribution urbaine est faible en comparaison, et la prise en considération de son influence sur l'attractivité exercée par l'aire urbaine sur l'environnement ne se justifie pas.

Dans ces conditions, le modèle de Decazeville, par rapport à celui de Forrester, a été orientée vers une étude économique et sociale, négligeant le facteur spatial en tant que fondement naturel de la croissance urbaine. Du modèle de Forrester sont donc conservés les secteurs de **l'industrie**, de la **population** et du **logement**. Le problème des impôts n'est pas retenu. En outre, à une distinction des industries selon leur âge est substituée une **différenciation selon le domaine d'activités**. Le modèle considère donc :

- le **secteur économique** avec trois niveaux que sont les *industries de base IB*, les *activités induites AI* et les *services SE*. Les IB correspondent aux industries exportatrices de leur production à l'extérieur de l'aire urbaine, créant de la sorte des richesses pour cette aire. Leur développement, résultat de la présence de ressources naturelles particulières, sera la cause du développement urbain. Les AI incluent les activités visant à la réélaboration des produits fabriqués par les industries de base. Les services comprennent des activités telles que le commerce, les écoles, les hôpitaux, etc. ;
- le **secteur de la population**, qui ne présente plus que deux niveaux : les *travailleurs T* et la *population sans qualification M* ;
- le **secteur du logement**, qui tient en *un seul niveau V*.

### 2.5.3. Mobisim III

De nombreux autres modèles de dynamique des systèmes appliqués à des villes ou des régions particulières ont été développés dans les années qui ont suivi l'élaboration du modèle de dynamique urbaine de Forrester. Après avoir connu une période un peu creuse, la dynamique des systèmes a connu en France un regain d'intérêt de la part des chercheurs qui s'intéressent aux systèmes urbains. C'est dans ce contexte que l'entreprise **ATN** ( Application de Techniques Nouvelles) a élaboré à l'aide de chercheurs dans de multiples disciplines, un modèle de dynamique des systèmes, **MOBISIM III**.

#### 2.5.3.1. Contexte et enjeux

En son temps, Forrester a cherché à appliquer au domaine de l'urbanisme les méthodes encore jeunes de la dynamique des systèmes à laquelle il venait de donner naissance. Ce faisant, son but était d'abord d'élargir le champ des applications de sa discipline, manière d'en tester les limites, puis de tenter de mieux comprendre les problèmes de croissance des grandes villes américaines, afin, éventuellement de pouvoir juger de la pertinence de telle ou telle politique publique. Dans le cas du développement de MOBISIM, la démarche est quelque peu inversée. La dynamique des systèmes a fait ses preuves dans le domaine, et l'enjeu ici est précisément et avant tout de construire un **outil d'aide à la décision** qui permette à des non initiés de tester différents scénarios, différentes politiques dans un but **prospectif**.

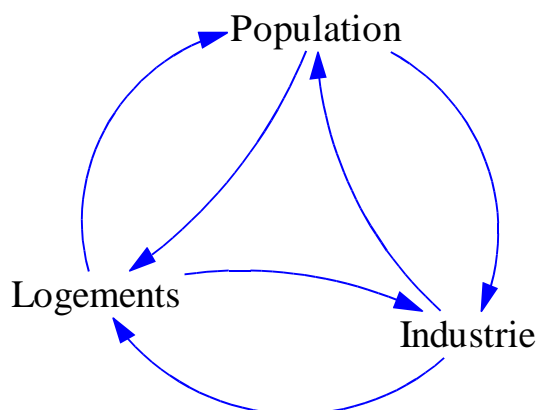
Depuis Forrester, la conception de l'urbanisme a beaucoup évolué. Ainsi aujourd'hui, la mobilité constitue un des enjeux stratégiques de nos sociétés. Les questions ayant trait aux phénomènes de **mobilité urbaine** sont parmi les plus complexes qui soient, résultat des interactions entre systèmes de transport et dynamiques spatiales, les liens de causalité qui se tissent entre ces deux systèmes étant de nature circulaire. Or, la question de la mobilité concerne à la fois l'État, les collectivités locales et territoriales, les autorités organisatrices de transport, les transporteurs publics et privés, et les ménages. Les décisions qui influent sur la mobilité sont donc très nombreuses, comme les actes d'aménagement du territoire, l'organisation ou la gestion des transports, et influent les unes sur les autres sans que les véritables conséquences de ces actions ne soient mesurées. Fort de ce constat quelque peu effrayant, ATN propose donc un outil qui permette à tout un chacun de comprendre les interactions qui lient les composantes les unes aux autres.

Le grand apport de MOBISIM par rapport aux modèles existant est la **prise en compte des interactions entre le système de transport et l'urbanisation**. Comme l'explique ses concepteurs :

*« La mobilité, dans ce modèle, est en partie déterminée par les politiques mises en œuvre sous forme de mesures réglementaires, fiscales ou tarifaires, ou de projets de développement d'infrastructures. Mais il intègre également les politiques ou les évolutions dans les domaines agissant sur la mobilité : démographie, urbanisme, logement, organisation sociale. Nous considérons que la mobilité est à la fois « déterminante de » et « déterminée par » les multiples processus : localisation de l'emploi, construction d'infrastructure, de nouveaux logements, expansion périurbaine, pollution, etc. »*

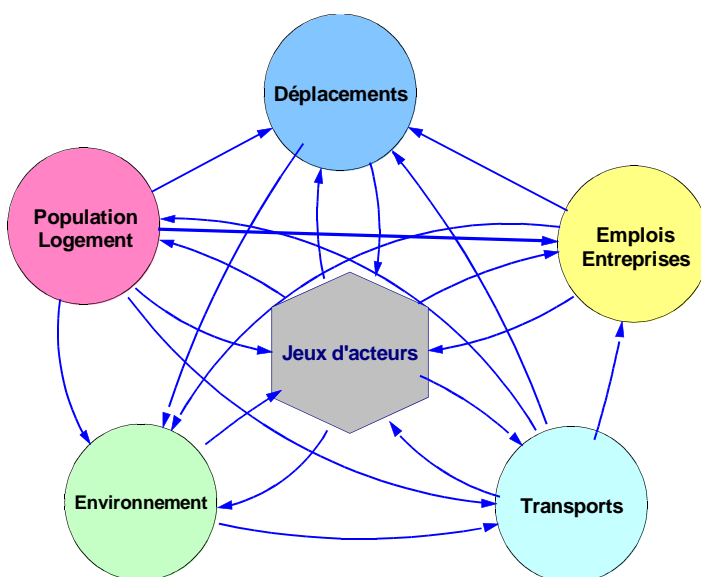
### 2.5.3.2. Structure du modèle et processus simulés

On se souvient de la structure globale du modèle de Forrester schématisée sous la forme suivante :



La prise en compte de la question de la mobilité dans MOBISIM aboutit pour la **structure globale** du modèle à la prise en compte non plus de trois mais de **six sous systèmes** en interaction les uns avec les autres :

#### Les différents sous systèmes considérés par le modèle Mobisim



Source : Mobisim

Dans sa forme actuelle, le modèle MobiSim DS représente sur un découpage de l'Aire urbaine en 3 zones (Centre, Banlieue, Périurbain) la dynamique des processus suivants.

**Localisation résidentielle.** La population de l'Aire urbaine suit les tendances socio-démographiques telles que le vieillissement de la population, la diminution de la taille des ménages ou la motorisation croissante. Le choix résidentiel en termes de localisation et type d'habitation, est basé sur l'attractivité de chaque zone, et influe sur la mobilité.

**Construction résidentielle et marché immobilier.** Les choix résidentiels des ménages sont contraints par la disponibilité et le prix des logements. La demande de logements correspond au nombre de ménages. Le prix de l'immobilier et la construction de logement neuf sont fonction du rapport entre l'offre et la demande.

**Localisation des emplois.** On distingue deux types d'emplois : les « emplois de base » sont définis pour chaque zone dans les scénarios, tandis que les « emplois induits » évoluent en fonction de la population. Le nombre et la localisation des emplois ont une incidence sur les comportements de mobilité.

**Déplacements.** Les déplacements de personnes résultent du besoin des ménages à réaliser un programme d'activités (travail, enseignement, achats, loisirs, services et autres). Les zones de destination sont fonction de la localisation des ménages, des entreprises, des écoles et des lieux de loisir, et des distances à parcourir pour réaliser ces activités. Le modèle estime également les déplacements générés par le transport de marchandises en ville.

**Choix modal.** Le choix du mode de déplacement motorisé est effectué en fonction de l'offre par mode (TC ou VP), de la durée et du coût de déplacement par mode, et de la commodité du déplacement (porte à porte, stationnement disponible). Le nombre de déplacements en modes légers est fonction de la proximité des logements par rapport aux emplois et services, et du taux de motorisation des ménages.

**Évolution du parc roulant.** La motorisation des ménages est fonction de la situation économique et de la prospérité des ménages. Le taux de motorisation dépend des zones d'habitations. Le parc de voitures est segmenté par type de motorisation (diesel / essence) et date de mise en circulation. Le type des voitures neuves achetées suit un scénario de tendance préférentielle.

**Trafic des véhicules.** Le réseau routier (représenté par la capacité des voies inter- et intra-zonales) est partagé entre les déplacements de personnes et le transport de marchandises. La vitesse de déplacement est estimée par des lois « Vitesse = F (Débit) » à partir du rapport entre le trafic généré et la capacité du réseau.

**Émissions.** L'évolution du parc roulant (par type de motorisation et années de mise en circulation) et la distance totale simulée des déplacements VP permettent de calculer les émissions par zone à partir des courbes ADEME / INRETS (émissions unitaires selon le type de motorisation et l'ancienneté du véhicule).

**Jeu d'acteurs : tarification et politique de réduction des émissions CO2 :** Le modèle présente de manière explicite les mécanismes de financement des transports en commun, sur la base des décisions prises pour compléter les recettes des entités organisatrices de transports : taxes fiscales versées par les usagers de voirie (péage urbain), aides et subventions de l'État et des autres collectivités territoriales. La limitation de puissance de motorisation VP est également modélisée.

Cette modélisation s'appuie sur le logiciel VENSIM, et la structure du modèle s'appuie sur une décomposition en 27 pages :

## Structure du modèle Mobisim

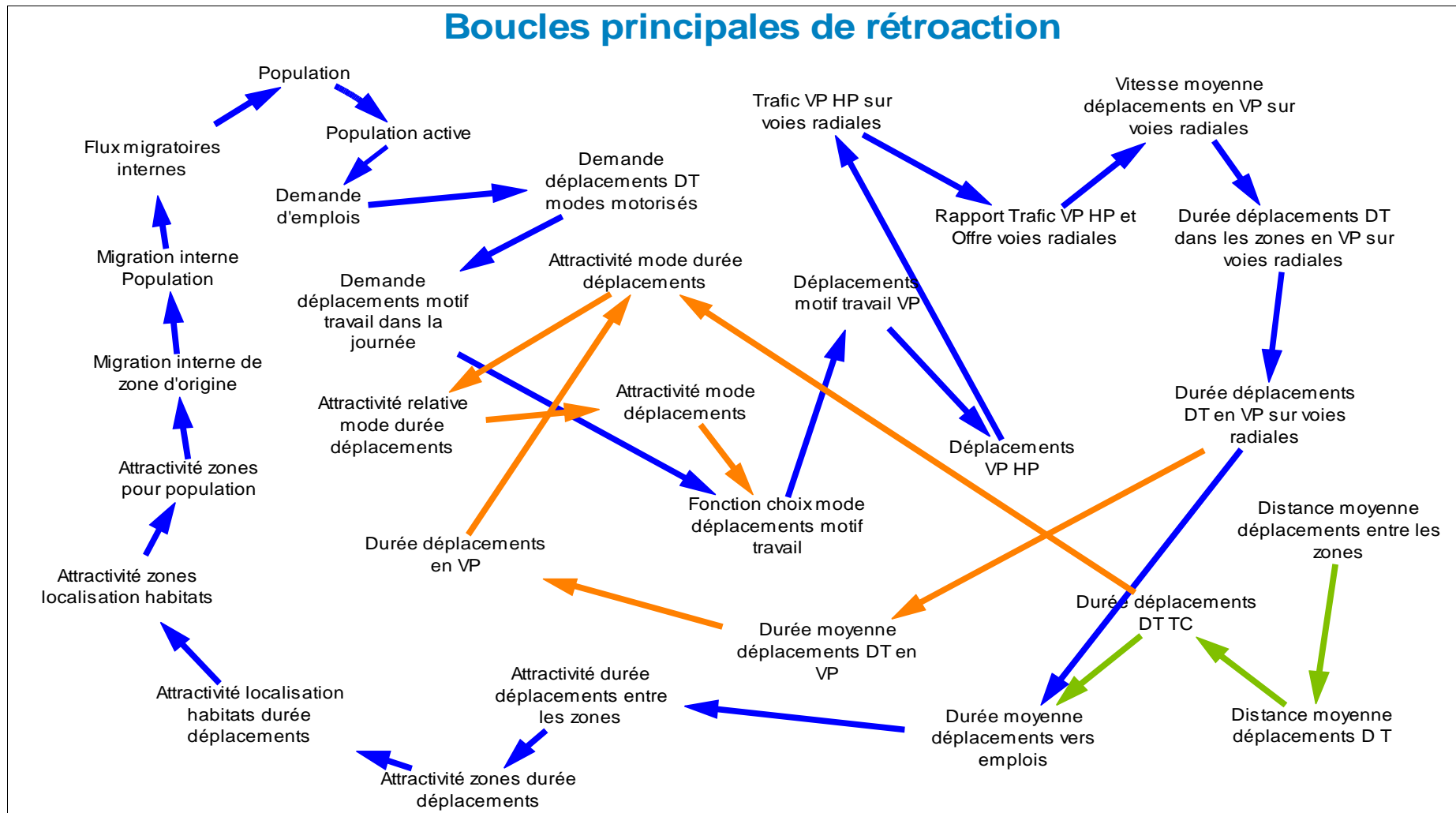
### Structure du modèle

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Boucles de rétroaction                | Déplacements enseignement primaire   |
| Localisation de Population            | Déplacements enseignement secondaire |
| Population                            | Déplacements enseignement supérieur  |
| Logements                             | Déplacements d'autres motifs         |
| Localisation habitats                 | Déplacements dans l'aire urbaine     |
| Migration de ménages                  | Déplacements                         |
| Emplois                               | Indicateurs déplacements             |
| Attractivité mode déplacements        | Trafic VP                            |
| Demande déplacements motif travail    | Probabilité et distance déplacements |
| Choix mode déplacements motif travail | Vitesse et durée déplacements        |
| Déplacements motif achats             | Offre routes                         |
| Déplacements motif loisirs            | Offre TC                             |
| Déplacements motif services           | Coûts déplacements                   |
|                                       | Parc VP dans l'aire urbaine          |
|                                       | Emissions                            |

Source : Mobisim

L'ensemble des boucles de rétroaction est synthétisé par un diagramme causal.

## Principales boucles de rétroaction du modèle Mobisim



Source : Mobisim

**Le modèle est bien plus complexe que celui de Forrester, le nombre de sous systèmes considéré est plus grand et le travail est effectué sur trois zones.**

### 2.5.3.3. Limite du modèle et travaux en cours

Le modèle MOBISIM III a montré un comportement raisonnable et cohérent qui permette de conclure à sa **validation**. Toutefois, il a révélé des **faiblesses** sur plusieurs points. Ses capacités sont ainsi actuellement limitées par :

- le **découpage spatial en trois zones** constitue une **limitation** pour des applications plus *microscopiques* ;
- l'utilisation de **relations macroscopiques** réduit l'influence des mécanismes de comportements individuels des acteurs clés, les ménages et les entreprises ;
- du fait de la **décentralisation**, les acteurs institutionnels sont de plus en plus **autonomes**. Les relations très complexes entre les acteurs générateurs de mobilité et la gestion de cette mobilité ne peuvent être étudiées et modélisées dans une approche macroscopique, ce qui nécessite une approche plus fine.

L'ensemble de ces remarques ont conduit ATN à développer un nouveau logiciel s'appuyant sur la technique de **simulation Multi-Agents (MOBISIM SMA)** sur laquelle nous ne nous étendrons pas ici.

Dans ce chapitre, on a présenté la dynamique des systèmes, et quelques applications de cette discipline à l'étude des systèmes urbains. Cet aperçu comprend uniquement quelques échantillons des nombreux modèles qui ont été développés dans ce champ concret d'applications. À travers ces exemples, la dynamique des systèmes a révélé sa capacité à proposer des méthodes nouvelles qui semblent particulièrement bien adaptées à la nature du système urbain. Aracil va même plus loin :

*« C'est précisément dans ces modèles [...] que l'on rencontre les meilleures possibilités d'application pratique de la dynamique des systèmes. » [ARACIL : 1984]*

Ces modèles ont montré qu'ils étaient des instruments de grande valeur pour la **planification urbaine et régionale**, prouvant par là leur capacité à devenir de véritables **outils d'aide à la décision** pour les différents acteurs de l'aménagement. Néanmoins, le développement ces dernières années du modèle MOBISIM SMA basé sur la théorie Multi Agent résulte de la prise de conscience des **limites** de son prédécesseur MOBISIM III, modèle de dynamique des systèmes, à faire le lien entre les phénomènes microscopiques et les phénomènes macroscopiques. La dynamique des systèmes apparaît ainsi comme un outil très puissant pour étudier les systèmes macroscopiques, mais elle révèle ses faiblesses dès lors que le passage du *micro* au *macro* est en jeu.

Dans ces conditions, la question qui se pose à nous est celle de l'**avenir de la dynamique des systèmes**, et donc, avant cette question, et de manière plus générale, le temps est venu de dresser un **état des lieux** et des **perspectives d'avenir** non seulement de la dynamique des systèmes, mais de la systémique.

### 3. État des lieux et perspectives d'avenir

Les deux premiers chapitres mettent en évidence la **distinction** qu'il convient d'opérer entre systémique et dynamique des systèmes. Certes, l'approche systémique, en ce qu'elle renvoie à la fois au courant de pensée systémique et à la démarche systémique, apparaît comme **opérationnelle**, au même titre que la dynamique des systèmes. D'ailleurs, la démarche systémique et la dynamique des systèmes s'appuient sur un certain nombre de processus de mise en œuvre communs : analyse verbale, analyse causale, modélisation, etc. Ces similitudes ne sont pas fortuites, la dynamique des systèmes constituant une **méthode**, un **outil** développé sur les bases théoriques de la systémique. En d'autres termes, la dynamique des systèmes n'est pas *la* systémique, mais elle est *une* approche systémique. Cette différence est fondamentale en ce qu'elle permet d'appréhender non seulement les multiples **confusions** qui existent dans les représentations de ce qu'est la systémique, et de comprendre les évolutions contrastées de la systémique d'un côté, de la dynamique des systèmes de l'autre. Dans ce chapitre, il s'agit précisément de dresser l'**état des lieux** de l'une et de l'autre en France et de nous interroger sur les **perspectives d'avenir** de la pensée systémique et d'une discipline systémique.

#### 3.1. Approche systémique et dynamique des systèmes

La distinction qu'il faut opérer entre systémique et dynamique des systèmes est très importante car elle induit une **différenciation des destins** de ces deux démarches dont il est question dans les lignes qui suivent, et qui doivent être lues comme une présentation succincte de leur **évolution**, préalable à une analyse plus détaillée de leur positionnement actuel dans les champs de la recherche et de l'opérationnel.

##### 3.1.1. La systémique en quête d'épistémologie

La systémique, conçue à la fois comme pensée et comme démarche, s'est construite au cours du dernier demi-siècle. Plus précisément, en même temps qu'à travers le développement et la pratique de la démarche systémique les chercheurs et ingénieurs de toutes disciplines découvraient et établissaient les concepts qui définissent aujourd'hui la systémique, un certain nombre de théoriciens prenaient conscience de la portée de la pensée naissante. Au delà du **pragmatisme** de la méthodologie, les systémiciens étaient en train de construire une nouvelle manière de voir les choses, de concevoir le monde, de connaître le réel, bref, une **épistémologie** qui proposait une alternative, au moins dans ses grands principes, à l'épistémologie positiviste rationaliste dominante. Cette prise de conscience de la nature de la systémique est allée de pair avec celle de la nécessité de catalyser l'élévation de la méthodologie au niveau épistémologique par le travail de théorisation et d'animation du débat. Cet effort a notamment été le fait d'un certain nombre d'auteurs déjà évoqués dans d'autres lieux. Ainsi, Wiener et ses amis vont jouer un rôle important dans la **diffusion de la systémique** comme courant de pensée. Ils publient un manifeste **anti-positiviste** en 1943 et dès la fin des années 40, les premiers systémiciens ré-introduisent le **principe de finalité** dans leurs analyses. Mais cette première tentative passe finalement à l'époque relativement inaperçue.

Le deuxième apport va venir de la petite ville de Palo Alto, en Californie, où s'est concentré, dans l'immédiate après guerre, un mouvement extrêmement dynamique en psychologie. Parmi les chercheurs de l'école dite de Palo Alto, **Gregory Bateson** tient une place importante en interrogeant la place du sujet observant dans le processus de connaissance. Paul Watzlawick va plus loin dans le questionnement de la nature même de la connaissance en établissant que l'idée que nous nous faisons de la réalité n'est que le résultat d'une adéquation entre la pensée et un environnement existant en soi. Le débat arrive en **France** un peu plus tardivement, dans les années 70, porté par des gens comme Piaget ou Delattre. Ils contribuent



à introduire et à présenter cette **nouvelle épistémologie**. Les éléments de réflexion au cœur du débat sont toujours la place du sujet connaissant par rapport à l'objet, la connaissance comme processus, comme objet construit, etc. **Edgar Morin**, sociologue de formation, va contribuer à donner une ampleur alors inégalée à la réflexion épistémologique. Dans son ouvrage *Le paradigme perdu : la nature humaine*, il explique sa découverte des liens entre cybernétique et complexité et revient sur les origines de sa « *reconversion théorique* ». Auprès de Gregory Bateson, entre autres, il prospecte les différents courants de pensée qui se rencontrent sous le couvert de la théorie générale des systèmes. Cet engagement au sein de la pensée systémique le conduit à construire de 1977 à 1991 un **immense édifice intellectuel**, *La Méthode*, dans lequel il explore toutes les facettes de la notion de complexité et élabore de nombreux concepts.

Enfin, un autre auteur en France a joué et continue de jouer un rôle fondamental dans le débat épistémologique. Il s'agit de **Jean Louis Le Moigne**, brillant **théoricien de la démarche systémique**, qui s'investit complètement dans la réflexion épistémologique. Le débat en France sur la systémique est encore riche, notamment autour de groupes de réflexions tels que le MCX ou l'AFSCET, et il a probablement de beaux jours devant lui compte tenu des difficultés auxquelles doivent faire face, encore aujourd'hui, les systémiciens. D'un côté, le poids de l'**académisme** en France, caractérisé par un **cloisonnement** des disciplines, apparaît comme un frein à une démarche qui heurte ces habitudes. Par ailleurs, le mode d'éducation et la culture environnante contribuent à façonner les esprits dans le carcan du **cartésianisme** et du **positivisme**.

### 3.1.2. État des lieux de la dynamique des systèmes en France, un bilan plus contrasté

Le développement de la systémique a donné naissance à un certain nombre de disciplines, en même temps que le développement de ces disciplines sur la base des théories établies par le courant systémique contribuait à nourrir et à appuyer la légitimité de la pensée systémique. Parmi ces nombreuses disciplines dont fait par exemple partie la cybernétique, **la dynamique des systèmes** a connu son heure de gloire sous l'égide de son père Jay Forrester. La dynamique des systèmes s'est développée à la fin des années 50, et surtout dans les années 60. Elle atteint une certaine maturité au milieu des années 60 et gagne définitivement ses lettres de noblesse en investissant le champ de l'urbain à la fin des années 60. Enfin, elle connaît un succès bruyant au début des années 70 lorsque la méthode est appliquée par Jay Forrester à l'élaboration d'un modèle du monde controversé. La dynamique des systèmes est donc une **discipline toute jeune**, qui explose véritablement dans les années 70.

En **France**, elle connaît effectivement à cette époque un succès considérable. D'ailleurs, comme le rappelle Michel Karsky, c'est en France qu'est créée la System Dynamics Society et Jay Forrester fait de nombreuses conférences à Paris, dans un **climat d'émulation** autour de ces nouvelles méthodes. Et puis dans les années 80, l'intérêt pour la discipline a décliné, alors qu'il commençait véritablement à grandir aux États Unis. Cette évolution a moins à voir avec un désenchantement pour la matière qu'avec un **développement cyclique**, que nous développerons plus loin, où son enseignement et ses applications sont souvent en opposition de phase pour des raisons structurelles. Toujours est-il qu'aujourd'hui, l'état des lieux de la dynamique des systèmes en France n'est pas très encourageant. Certes, un certain nombre de personnes s'y intéressent et même travaillent sur le sujet, mais la plupart du temps, en ignorant l'existence les uns des autres, ce qui induit une dispersion des compétences sans lien entre elles. Dans ces conditions, le potentiel dans le domaine, qui pourtant existe, n'est pas exploité comme il le devrait.

## 3.2. Recherche et pratique

Les lignes qui précèdent montrent, dans les grandes lignes, les évolutions différenciées de la systémique et de la dynamique des systèmes. Un moyen de saisir plus précisément la position qu'occupent aujourd'hui l'une et l'autre dans le paysage scientifique français est de nous intéresser à leur statut dans les champs de la **recherche** et de l'**opérationnel**. Ainsi, systémique et dynamique des systèmes ne sont-ils pas sur le même plan en fonction du champ dans lequel ils sont considérés. Il convient, pour mieux comprendre cette différenciation des statuts, de commencer par nous intéresser au développement de l'enseignement et de la pratique de la dynamique des systèmes en France au cours de ces trente dernières années.

### 3.2.1. Enseignement et pratique de la dynamique des systèmes

Jusqu'à présent, et ce depuis des années, l'enseignement de la dynamique des systèmes et sa pratique se sont développés en opposition de phase. Dans les années 70, très prisée dans l'**enseignement supérieur**, en universités et grandes écoles, la dynamique des systèmes ne faisait pas l'objet d'un grand intérêt dans les **grandes entreprises** : une seule d'entre elles, ELF Aquitaine, tentait d'en développer l'utilisation pour des besoins internes. Dans les années qui suivirent, la dynamique des systèmes a perdu son attrait auprès des étudiants alors qu'elle gagnait ses lettres de noblesse au sein de l'industrie (Renault, EDF, Pechiney) ou de certains organismes publics tels que le CNRS. Ce **phénomène d'opposition de phase** entre l'offre sur le marché du travail et l'enseignement proposé s'explique par le phénomène suivant : il existe une offre dans l'industrie. Les étudiants se tournent donc vers un enseignement en dynamique des systèmes, mais au moment où ils sortent des universités diplômés en poche, les utilisateurs potentiels se sont lassés et tournés vers d'autres approches. Les étudiants ayant acquis en vain des compétences dans le domaine se découragent de découvrir un monde du travail où l'offre a disparu. Ce découragement se transmet aux responsables des programmes d'enseignement qui préfèrent mettre en place des thèmes plus porteurs. Pourtant, l'absence de spécialistes compétents n'amène pas la disparition de la dynamique des systèmes, car les problèmes subsistent. La **complexité** est toujours aussi difficile à appréhender, et les outils méthodologiques font toujours défaut. Le besoin d'une approche *Dynamique des systèmes* renaît, on cherche à nouveau des dynamiciens des systèmes, on le fait savoir aux professeurs... et le cycle reprend.

Compte tenu d'une situation assez particulière à la France semble-t-il, où le développement de la dynamique des systèmes est finalement plus important en milieu industriel qu'au sein de l'université, les **enseignants potentiels** ayant une expérience en la matière sont peu disponibles, sinon pour faire de temps à autre une conférence. L'absence relative d'universitaires prêts à consacrer un temps important à la création d'un cursus de dynamique des systèmes a été, sinon un frein, tout au moins une force manquante dans la structure nécessaire au développement potentiel de cette science. Aujourd'hui, il semble que l'enseignement dans ce domaine soit de nouveau assez pauvre et que la demande dans le monde du travail se soit elle aussi amoindrie.

Pourtant, s'il existe des **avancées** dans le domaine de la dynamique des systèmes, c'est bien dans le **champ de l'opérationnel** qu'elles ont lieu, le domaine de la recherche investissant plus volontiers le domaine de la systémique. En 1974, Michel Karsky fonde KBS, qui est à l'époque LA société de dynamique des systèmes en France. Il applique la dynamique des systèmes dans de nombreux domaines, sauf les domaines financiers : économie, physique, management, marketing, biologie, etc. Ses clients sont les universitaires pour le volet enseignement, et des consultants, ainsi que des grandes entreprises françaises et étrangères. C'est également KBS qui s'occupait de la vente du logiciel **VENSIM** en France. Avec le départ en retraite de Michel Karsky, cette société a disparu. Aujourd'hui, c'est la société ATN qui s'est positionné sur le marché finalement peu développé de la dynamique des systèmes. Elle a repris les droits de **VENSIM** en France et les a utilisés afin de construire le modèle MOBISIM. À travers ce modèle ils ont pu réaliser un certain nombre d'études à l'interface entre urbanisme et mobilité.

Par ailleurs, cette société a mené des études dans le domaine des transports et elle a également fait des études de marché. D'après Michel Karsky, c'est précisément à travers le développement de modèles que seront éventuellement développées de nouvelles méthodes. Il importe avant tout d'appliquer la dynamique des systèmes, la recherche n'est pour lui pas essentielle dans ce domaine.

### 3.2.2. La recherche critique à l'égard de la dynamique des systèmes, et ouverte sur la systémique

Une telle attitude peut être interprétée comme une forme de **rupture assumée** par un *technicien* de la dynamique des systèmes avec un monde de la recherche qui semble s'être désintéressé depuis quelque temps déjà de la dynamique des systèmes. Ainsi, on a un peu l'impression que les chercheurs ont *fait le tour* de la dynamique des systèmes et qu'ils se sont tourné vers d'autres méthodes. Si le domaine de la dynamique des systèmes semble quelque peu délaissé par les chercheurs en France (aux États Unis, la communauté de dynamiciens des systèmes, bien que confrontée à des problèmes du même ordre, est sans commune mesure beaucoup plus développée), le champ de la systémique est lui le lieu de multiples travaux de recherches et semble même être particulièrement porteur. La recherche dans ce domaine a exploré des voies de réflexion multiples et de nombreuses méthodologies telles que par exemple la **théorie des systèmes Multi-Agents** qui suscite aujourd'hui un engouement considérable. La recherche en systémique est particulièrement féconde dans le domaine de l'urbain entendu au sens le plus large, nous y reviendrons dans le paragraphe suivant. Mais elle explore également les potentialités de la systémique dans de nombreux autres domaines, débouchant parfois sur la mise en œuvre d'outils opérationnels.

L'évolution de l'**AFSCET** est assez représentative de l'évolution contrastée de la dynamique des systèmes d'une part et de la systémique de l'autre. Ainsi, au départ, cette association regroupait principalement un certain nombre de gens que la dynamique des systèmes intéressait. Mais la perte de souffle de la dynamique des systèmes et, à l'inverse, l'imposition de l'approche systémique comme démarche de pensée transversale à de nombreuses disciplines confrontées à la question de la complexité, ont conduit à un élargissement de la base des adhérents. L'association est aujourd'hui un lieu d'échange où sont confrontés enseignements et pratiques dans le domaine de la systémique en général. Elle est aussi l'association représentant la France auprès de l'Union Européenne de Systémique.

### 3.2.3. Le domaine de l'urbain investi différemment par les systémiciens et les dynamiciens des systèmes.

La dichotomie systémique/dynamique des systèmes apparaît de manière particulièrement évidente dans le domaine de l'urbain. Ce champ a été originellement investi avec enthousiasme à la fois par les dynamiciens des systèmes et par les systémiciens qui ont trouvé dans les problématiques liées à la ville un terrain d'expérimentation et de maturation de leurs théories et méthodologies. Un aperçu des travaux qui ont été menés dans le domaine a été donné plus haut. Toutefois, au delà de cet intérêt premier commun, le développement des deux approches n'aura pas la même évolution par rapport à l'urbain. Ainsi, la dynamique des systèmes va atteindre relativement tôt ses limites en matière de **représentation de la complexité urbaine**. Le **caractère a-spatial** des modèles de dynamique des systèmes constitue l'obstacle le plus important au succès de cette discipline dans le domaine de l'urbain. Lorsque Forrester construisait ses modèles, il utilisait le langage dynamo et faisait véritablement de la programmation informatique. Aujourd'hui, les logiciels qui ont été conçus pour faciliter la saisie des modèles de dynamique des systèmes (Vensim, Stella, Ithink...) sont extrêmement simples, il ne s'agit plus du tout de faire de la programmation, et ils sont par ailleurs très puissants, notamment en comparaison de ce que Forrester pouvait obtenir à son époque. En dépit de ces progrès, pourtant, la **prise en compte de l'espace** est toujours très limitée dans les modèles de dynamique

des systèmes. C'est probablement son principal défaut. En tout cas c'est ce qui a conduit les chercheurs à explorer d'autres théories. Au niveau de l'UMR Géographie Cités du CNRS, dirigé par Denise Pumain, les chercheurs travaillent sur les différentes méthodes de modélisation urbaine. Pour les raisons qui viennent d'être invoquées, la dynamique des systèmes a été rejetée par ce groupe qui s'est tourné plus volontiers vers d'autres **courants de modélisation**: les modèles d'auto organisation, l'école de Stuttgart, les systèmes Multi Agents, etc.

Toutefois, au delà des résultats intéressants auxquels elle a pu parvenir, la recherche dans le domaine de la systémique appliquée à l'urbain continue d'éprouver ses limites et peine à concrétiser ses avancées dans l'opérationnel. À ceci, plusieurs raisons. Ce genre d'outils présentent des limites de plusieurs ordres. La **limite théorique** la plus importante est l'impossibilité de prendre en compte la notion d'**innovation**, de progrès, dans les modèles, ce qui vient générer des incertitudes considérables. Ensuite, si sur le plan théorique le bagage de connaissances sur les phénomènes dynamiques est relativement important, sur le plan pratique, les incertitudes sont nombreuses. La **dépendance des modèles aux échelles** par exemple est assez significative. Le choix même de l'échelle n'est par ailleurs pas sans poser problème. On a pris l'habitude de parler de l'urbain ou de la ville comme si l'échelle était évidente, mais il n'en est rien. Outre les phénomènes de péri urbanisation, et les multiples réflexions qui existent autour de la question des déplacements, il existe un certain flou autour de la question des échelles. Une troisième limite tient en l'impossibilité d'intégrer aux modèles la **dimension décisionnelle**. En d'autres termes, les modèles ne prennent pas en compte la manière dont le décideur, à qui revient le verdict final, en arrive à trancher. On n'a jamais accès à l'univers des paramètres dans lequel évolue le décideur. De même, il est difficile de mesurer l'impact de ce que l'on appelle les prophéties auto-réalisatrices, c'est-à-dire l'**effet d'entraînement consécutif de la prise de décision**.

La question de la décision intervient de manière prépondérante dans les représentations systémiques de l'urbain. Préoccupation de nombreux élus et décideurs, ce domaine est en même temps précisément le lieu de leur action. Il n'a pas échappé à ceux qui s'y intéressent que la systémique et la dynamique des systèmes, en ce qu'elles ont vocation à fournir une compréhension inédite de la complexité, pouvait offrir aux élus et autres décideurs les clés d'une meilleure analyse de la complexité urbaine et même, peut être, des **outils opérationnels d'aide à la décision**. Cette question soulève beaucoup d'interrogations et de réserves. En effet, au delà de la difficulté de juger la capacité prospective à moyen et long terme d'outils encore trop jeunes pour avoir fait leurs preuves, il existe un certain nombre de limites à l'utilisation des méthodes systémiques et des modèles de dynamique des systèmes comme **outils d'aide à la décision**.

La dynamique des systèmes apparaît comme un outil puissant pour regarder ce qui se passe à moyen et long terme, notamment parce que les phénomènes de rétroaction mettent du temps à devenir agissant. Or peu de gens, et paradoxalement encore moins les élus, ont le souci constant du long terme. En ce qui concerne les maires par exemple, qui pourraient constituer une cible pour ce type d'outils, il y a fort à parier qu'ils n'ont pas le luxe de pouvoir accorder leur temps à la compréhension de tels modèles. Si au niveau politique l'intérêt pour ce type d'outils est donc relativement pauvre, peut être susciteraient-ils une curiosité plus grande au niveau des techniciens, et des services tels que les agences d'urbanisme, et les cabinets de conseils. Mais globalement, le marché de ce côté là aussi semble relativement fermé.

Par ailleurs, la difficile **communicabilité** de tels outils est probablement le frein le plus important. Ceci est particulièrement vrai avec les représentations de la ville qui s'appuient sur la dynamique des systèmes. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les diagrammes ne rendent pas ici les phénomènes observés plus clairs, et diagrammes et graphiques ont même tendance à effrayer les non initiés. En fait, les deux étapes de la dynamique des systèmes ne reçoivent pas le même accueil. Ainsi, la **phase d'analyse causale** qui consiste à poser les choses à plat, à essayer de saisir les variables qui entrent en jeu dans le système et les liens qui se tissent entre elles s'avère relativement facile, disons **abordable**, et les dirigeants consentent assez facilement à y investir un peu de leur temps. Cette phase est certes indispensable et très

intéressante, mais dès lors qu'il s'agit de construire des outils destinés à offrir une aide à la décision, le passage à la deuxième **phase de quantification** qui aboutit à la simulation est obligatoire. Or, la phase de modélisation est une phase difficile, rébarbative, rebutante, et si la présence et la participation des décideurs n'est pas requise tout au long du processus, elle l'est au moins un minimum. À défaut d'un **investissement intellectuel et en temps** suffisant de la part du décideur, l'outil apparaîtra au final comme une *boîte noire* dont les résultats risquent d'être rejetés s'ils apparaissent – et ils apparaissent presque toujours – comme contre intuitifs par rapport à ce que le décideur croit savoir du phénomène étudié. Ce qui apparaît ici, c'est le **caractère indissociable des études et de celui qui les commande**, dans la mesure où cela veut dire qu'il a consenti à faire l'effort de compréhension nécessaire. Le succès d'un modèle est tributaire de l'implication de ceux qui en auront l'usage. L'on comprend dès lors les **limites intrinsèques** qui existent à l'utilisation de modèles comme outils d'aide à la décision. Toutefois, il convient de nuancer un propos qui peut sembler défaitiste. L'investissement consenti dans la première phase de la systémique est déjà une victoire remarquable dans les circonstances actuelles. Amener un décideur à envisager un problème complexe à travers une analyse systémique rigoureuse constitue en soi un dépassement des **insuffisances de la démarche analytique**. Par conséquent, la connaissance qu'il aura du problème envisagé sera de toute façon meilleure que celle qu'il aurait eue s'il n'avait pas investi ne serait-ce qu'un peu de son temps dans une démarche systémique.

Si l'investissement en temps n'est pas consenti, peut-être faut-il se contenter de fournir la boîte noire. Mais alors, les questions qui se posent sont de deux ordres : tout d'abord, une **question de forme**, celle de l'**interface du logiciel**, devient fondamentale. La difficulté est de proposer un logiciel d'utilisation qui offre à son utilisateur à la fois la simplicité d'un outil manipulable par des non initiés et la complexité nécessaire à l'élaboration et au test de plusieurs scénarios s'appuyant sur des ajustements fins. Patrice Salini, face au caractère inextricable de cette situation, ironise : « *ce qui manque, c'est le jeu vidéo pour politiques.* » L'effort à fournir en terme de communicabilité de l'outil est particulièrement important. Se pose ensuite une **question de fond** qui touche à la légitimité de l'utilisateur ignorant ce qui se passe au niveau de la boîte noire. Le risque n'est pas exclu que des décideurs mal intentionnés s'abritent derrière l'objectivité attribuée à la scientificité d'un tel outil pour justifier des décisions qui soulèvent des objections. La méconnaissance, ou en tout cas le déni, de la place de la subjectivité dans un outil systémique, pose la question du **rapport entre l'éclairage des choix par l'outil et l'organisation de la transparence de la démocratie**.

Ce chapitre dresse donc un rapide état des lieux des connaissances dans les domaines de la systémique et de la dynamique de systèmes. L'approche systémique et les outils qui se sont développés avec elle sont encore jeunes, et en cela, il semble logique qu'ils rencontrent des difficultés à se saisir de certains objets, en même temps que la poursuite de la recherche dans ce domaine apparaît comme tout à fait légitime. Aujourd'hui, le temps est venu, semble-t-il, d'apporter un effort tout particulier à la vulgarisation des différents travaux de modélisation systémique de l'urbain. Car au-delà de la difficile communicabilité des avancées de la recherche dans ce domaine existe un véritable enjeu en terme de connaissances.

## Conclusion

L'intention originelle d'éclairer non seulement *ce qu'est* la systémique, mais peut-être surtout *ce qu'elle n'est pas*, nous a donc conduit à explorer les **origines historico-philosophiques** du courant de **pensée systémique**, avant de décrire la **démarche systémique**. L'application de cette démarche au **système ville** a mis en évidence les mécanismes de sa mise en oeuvre, améliorant par là la compréhension de l'intérêt de l'approche systémique. Cette volonté de dissiper les confusions, doublée par ailleurs de l'envie d'inviter à la découverte d'une des disciplines nées des théories de la systémique, a motivé la rédaction d'un second chapitre, symétrique au premier, consacré à la mise en perspective historique de la **dynamique des systèmes**, à la description de la technique de représentation et à l'analyse de quelques modèles consacrés à la dynamique urbaine. Enfin, il s'est agit dans un dernier chapitre de dresser **l'état des lieux des connaissances** en systémique d'une part, en dynamique des systèmes de l'autre, dans le champ scientifique français.

La systémique est donc à la fois une **pensée**, une épistémologie, qui s'appuie sur un certain nombre de concepts et de principes, au même titre que la pensée analytique dominante au siècle dernier, et une **démarche intellectuelle** mise en oeuvre dans la tentative d'appréhension de la complexité. Ce caractère opérationnel n'est pas sans rapport avec la **confusion** qui existe autour de la systémique, souvent assimilée à tort aux différentes disciplines qui se sont développées avec elle, telles que la dynamique des systèmes, la cybernétique, etc. Par ailleurs, si la systémique est une approche particulièrement appropriée à la saisie des systèmes complexes, parmi lesquels les systèmes sociaux, *elle n'est pas la seule approche possible*. Dans un souci de dépassement du débat quelque peu stérile qui oppose **partisans aveugles** et **détracteurs farouches** de la systémique, il convient ici de relativiser, sans la minimiser, l'importance de la systémique dans la champ de la connaissance scientifique. En effet, la systémique a ceci de remarquable qu'elle contribue à **infléchir les consciences dans le sens d'une approche globale, transversale et multidisciplinaire** des problèmes complexes, favorisant une sortie du cloisonnement rigide et souvent infécond propre au cartésianisme dont elle participe par ailleurs à soulever le caractère idéologique en même temps qu'elle ose questionner la légitimité de la prégnance de cette seule pensée dans les sociétés occidentales contemporaines. Toutefois, au delà de la reconnaissance de cette qualité, il ne faudrait pas en conclure à la supériorité absolue de la systémique. **La systémique n'est pas non plus la panacée**. Nous avons insisté déjà sur la nécessité de dépasser la séparation radicale des démarches analytique et systémique pour privilégier la complémentarité de ces approches. De même, la systémique ne vient pas remplacer les disciplines traditionnelles telles que la sociologie ou l'économie, qu'elle invite au contraire à solliciter dans un **rapprochement synergique et synthétique** souvent particulièrement riche. Enfin, la systémique a éprouvé ses limites sur certains sujets, ses outils ont été confrontés à des objets qu'ils se sont avérés incapables d'aborder efficacement, et aujourd'hui encore il ne faudrait pas croire que l'ensemble des questions d'ordre épistémologique et des problèmes en terme d'applicabilité sont résolus. Dans ces conditions, il semble hasardeux et prématuré d'en conclure à la toute puissance de la pensée et de la méthode, en même temps qu'il serait tout à fait présomptueux de renoncer à poursuivre l'exploration de leurs potentialités.

L'état des lieux des connaissances dans le domaine général de la systémique a donc permis de montrer qu'entre les positions extrêmes de l'admiration sans borne de la systémique d'un côté et de son rejet total de l'autre, il existe une **troisième voie de pensée** qui consiste à reconnaître **l'intérêt de la spécificité** de l'approche systémique et des outils qu'elle fournit dans le champ scientifique, et à ne pas minimiser ses apports intellectuels et méthodologiques. Dans cet espace occupé par un certain nombre de chercheurs et de praticiens se pose la question du développement et de la diffusion de cette pensée. En effet, si l'approche systémique devrait être encouragée chez tous ceux qui s'intéressent à des systèmes, des problèmes complexes qui évoluent dans le temps, il serait illusoire et contre productif de laisser croire que l'approche systémique est abordable par tout un chacun. Il s'agit d'une **approche scientifique rigoureuse**, et qui demande

d'autant plus de travail que sa mise en oeuvre suppose la remise en cause, **le bouleversement même de sa propre façon de penser**, conditionnée par la rationalité analytique dominante. Quant aux outils systémiques, tels que la dynamique des systèmes, ils sont par nature l'affaire de spécialistes qui auront consacré un temps certain à leur apprentissage.

En conclusion, le temps semble venu d'interroger le rôle que pourrait jouer un organisme tel que le **Certu** dans le développement de la systémique. À mon sens, la question se pose également et dans un premier temps dans le sens inverse, à savoir: quelle place la systémique et ses outils devraient ou pourraient-ils occuper dans le Certu, et peut-être à plus grande échelle, dans le ministère de l'Équipement? Tout d'abord, comme cela a déjà été évoqué, l'approche systémique devrait être sollicitée – ne serait-ce que ponctuellement, et dans sa forme la plus *douce* – par tous ceux qui travaillent sur des **problèmes complexes dont l'évolution dans le temps présente des enjeux particuliers**. La généralisation du recours à la systémique devrait au moins avoir pour premier intérêt de combattre *de l'intérieur* les réticences à la transversalité et à l'interdisciplinarité. Néanmoins, la systémique est une démarche scientifique difficile, dont la mise en oeuvre dans sa forme la plus rigoureuse – qui peut notamment être appelée à solliciter un certain nombre de ses outils – ne peut être le fait que de **spécialistes**. Dans ces conditions, il semble intéressant de développer des **pôles de compétences** dans le domaine, non seulement au sein du Certu, mais aussi dans les services de l'État confrontés à la complexité. Ces pôles de compétence devront être capables de suivre l'**actualité systémique**, d'animer des **réseaux**, et de provoquer les rencontres à travers l'organisation de **colloques et conférences**. Il semble bien que le Certu soit tout à fait le lieu où travailler à la vulgarisation des travaux de modélisation systémique appliqué à l'objet urbain. Enfin, un chantier qu'il reste à investir, mais qui déborde probablement largement les champs d'action du Certu, est celui de l'**enseignement de la systémique**. Il semble urgent de diffuser dans les écoles l'idée que non pas face à, mais aux côtés de la pensée analytique existe une approche synthétisante qui s'est développée depuis les années 1930, dont il faut au moins tenir compte et qui peut ouvrir des **perspectives nouvelles**.

## Bibliographie

### Bibliographie non exhaustive pour une introduction aux concepts

- ARACIL J.:** *Introduction à la dynamique des systèmes*, Presses Universitaires de Lyon, 1984
- ATLAN H.:** *Entre le cristal et la fumée*, Seuil, 1979
- BACHELARD G.:** *Le Nouvel Esprit Scientifique*, Presses Universitaires de France, 1934
- BATESON G.:** *La nature et la pensée*, Seuil, 1984
- DE ROSNAY J.:** *Le Macroscope, vers une vision globale*, Points, Seuil, 1975
- DONNADIEU G., KARSKY M.:** *La systémique, penser et agir dans la complexité*, Éditions Liaisons, 2002
- FORRESTER J.:** *Dynamique urbaine, economica*, 1979
- KOYRE A.:** *Études Newtoniennes*, Gallimard, 1968
- LE MOIGNE J.L.:** *La théorie du système général*, Presses Universitaires de France, 1979
- LE MOIGNE J.L.:** *Le constructivisme*, 3 tomes, L'Harmattan, 2002, 2003
- LE MOIGNE J.L.:** *Les épistémologies constructivistes*, Presses Universitaires de France, Collection « Que sais-je? », 1995
- MORIN E.:** *Introduction à la pensée complexe*, Points, Seuil, 2005
- MORIN E.:** *Le paradigme perdu: la nature humaine*, Points, Seuil, 1979
- PIAGET J.:** *La construction du réel chez l'enfant*, Nestlé Delachaux, 1937
- SENGE P.:** *The Fifth Discipline*, Currency, 1994
- SIMON H.:** *La science des systèmes, science de l'artificiel*, EPI Éditeurs, 1974
- THEILARD DE CHARDIN P.:** *Le phénomène urbain*, Seuil, 1955
- VILMIN T.:** *L'aménagement urbain en France, une approche systémique*, Éditions du Certu, 1999
- VON BERTALANFFY L.:** *Théorie générale des systèmes*, Dunod, 1950





## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. La systémique – fondements épistémologiques.....</b>                       | <b>9</b>  |
| 1.1. Considérations historiques.....   | 9         |
| 1.1.1. Naissance et développement du paradigme positiviste.....                  | 9         |
| 1.1.1.1. De Platon et Aristote à Descartes et Newton .....                       | 9         |
| 1.1.1.2. Auguste Comte et l'avènement du paradigme positiviste.....              | 11        |
| 1.1.2. Contestations et mises en question des fondements du positivisme.....     | 12        |
| 1.1.2.1. Quelques précurseurs.....   | 12        |
| 1.1.2.2. Le XXe siècle.....  | 13        |
| 1.1.3. Naissance et développement du paradigme systémique.....                   | 15        |
| 1.1.3.1. Des années 30 aux années 70.....  | 15        |
| 1.1.3.2. Les années 70.....  | 16        |
| 1.2. Des approches systémiques – de l'opérationalité<br>de la systémique.....    | 17        |
| 1.2.1. Complexité et systémique.....   | 17        |
| 1.2.2. La notion de système.....   | 18        |
| 1.2.3. L'approche systémique : de quoi s'agit-il?.....                           | 19        |
| 1.2.3.1. Ce qu'elle n'est pas.....   | 19        |
| 1.2.3.2. Approche analytique VS approche systémique.....                         | 20        |
| 1.2.3.3. Les concepts de base.....   | 21        |
| 1.2.3.3.1. Représentation des systèmes.....                                      | 21        |
| 1.2.3.3.2. Structure des systèmes.....   | 21        |
| 1.2.3.3.3. Variables de flux et variables d'état - « Stock and Flow ».....       | 21        |
| 1.2.3.3.4. La rétroaction comme mécanisme de base.....                           | 22        |
| 1.2.3.4. Régulation des systèmes.....  | 23        |
| 1.2.3.4.1. La dynamique du maintien.....   | 23        |
| 1.2.3.4.2. La dynamique du changement.....                                       | 23        |
| 1.2.3.5. Niveaux d'organisation et régulation.....                               | 24        |
| 1.2.4. Quelques méthodes systémiques.....  | 28        |
| 1.2.4.1. Les étapes de la démarche systémique.....                               | 29        |
| 1.2.4.1.1. L'analyse de systèmes ou exploration systémiques.....                 | 29        |
| 1.2.4.1.2. La modélisation qualitative.....                                      | 29        |
| 1.2.4.1.3. La modélisation dynamique ou simulation.....                          | 30        |
| 1.2.4.2. Quelques méthodes systémiques.....                                      | 31        |
| 1.2.4.2.1. La triangulation systématique.....                                    | 31        |
| 1.2.4.2.2. Le découpage systématique.....  | 31        |
| 1.2.4.2.3. L'analogie.....   | 32        |
| 1.3. Une approche systémique de la ville.....                                    | 32        |
| 1.3.1. La ville comme système complexe.....                                      | 32        |
| 1.3.2. Une ou des approches systémiques ?.....                                   | 33        |
| <b>2. La dynamique des systèmes<br/>    ou la systémique de l'ingénieur.....</b> | <b>37</b> |

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Naissance et développement.....  | 37 |
| 2.2. Les concepts fondamentaux de la dynamique des systèmes.....              | 39 |
| 2.2.1. Notion de système dynamique.....                                       | 39 |
| 2.2.2. Typologie des variables.....   | 40 |
| 2.2.3. Les boucles de rétroaction.....  | 41 |
| 2.2.3.1. Boucles négatives ou stabilisantes.....                              | 41 |
| 2.2.3.2. Boucles positives ou amplifiantes.....                               | 42 |
| 2.2.3.3. Notion d'objectif.....   | 42 |
| 2.2.3.4. Interaction entre boucles.....                                       | 43 |
| 2.2.4. Retards et délais.....   | 44 |
| 2.2.5. Non linéarité.....   | 44 |
| 2.2.6. Évolution structurelle.....  | 45 |
| 2.2.7. Synthèse.....  | 45 |
| 2.3. Processus de modélisation dynamique.....                                 | 46 |
| 2.3.1. Le Modèle verbal.....  | 46 |
| 2.3.2. Le diagramme causal.....   | 46 |
| 2.3.3. Phase de modélisation – Diagramme de Forrester.....                    | 47 |
| 2.3.3.1. Principes généraux.....  | 47 |
| 2.3.3.2. Formalisation et quantification.....                                 | 47 |
| 2.3.3.2.1. Formalisation des relations.....                                   | 48 |
| 2.3.3.2.2. Quantification et paramétrage.....                                 | 48 |
| 2.3.4. Calibrage et validation.....   | 49 |
| 2.4. Quelques modèles classiques.....   | 50 |
| 2.4.1. Des modèles élémentaires.....  | 50 |
| 2.4.1.1. Modèle de la boule de neige.....                                     | 50 |
| 2.4.1.2. Mise en évidence de la notion d'objectif.....                        | 51 |
| 2.4.2. Du simple au complexe, des modèles pour un système.....                | 53 |
| 2.5. La ville comme système complexe objet de la dynamique des systèmes ..... | 55 |
| 2.5.1. La dynamique urbaine de Forrester.....                                 | 56 |
| 2.5.1.1. Introduction.....  | 56 |
| 2.5.1.2. Démarche.....  | 57 |
| 2.5.1.3. Structure du modèle urbain de Forrester.....                         | 57 |
| 2.5.1.3.1. Frontières du système.....   | 57 |
| 2.5.1.3.2. L'attractivité relative.....                                       | 57 |
| 2.5.1.3.3. Les trois sous systèmes du modèle.....                             | 58 |
| 2.5.1.3.4. Quantification – Calcul d'un flux.....                             | 59 |
| 2.5.1.4. Quelques simulations .....   | 62 |
| 2.5.1.4.1. Croissance et stagnation.....                                      | 63 |
| 2.5.1.4.2. Équilibre.....   | 63 |
| 2.5.1.5. Conclusion.....  | 64 |
| 2.5.2. Le modèle de Decazeville.....  | 64 |
| 2.5.3. Mobisim III.....   | 65 |
| 2.5.3.1. Contexte et enjeux.....  | 65 |
| 2.5.3.2. Structure du modèle et processus simulés .....                       | 66 |
| 2.5.3.3. Limite du modèle et travaux en cours.....                            | 70 |

|  |               |
|--|---------------|
| <b>3. État des lieux et perspectives d'avenir.....</b>   | <b>71</b>     |
| 3.1. Approche systémique et dynamique des systèmes.....  | 71            |
| 3.1.1. La systémique en quête d'épistémologie.....   | 71            |
| 3.1.2. État des lieux de la dynamique des systèmes en France, un bilan plus contrasté...72                   |               |
| 3.2. Recherche et pratique.....  | 73            |
| 3.2.1. Enseignement et pratique de la dynamique des systèmes.....  | 73            |
| 3.2.2. La recherche critique à l'égard de la dynamique des systèmes,<br>et ouverte sur la systémique.....    | 74            |
| 3.2.3. Le domaine de l'urbain investi différemment par les systémiciens et les dynamiciens des systèmes..... | 74            |
| <br><b>Conclusion.....</b>   | <br><b>77</b> |
| <br><b>Bibliographie.....</b>  | <br><b>79</b> |

© ministère de l'Écologie, de Développement et de l'Aménagement durables  
centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Certu est illicite (loi du 11 mars 1957).  
Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

Crédits photos : Les illustrations sans source indiquée dans le corps de l'ouvrage proviennent du Certu ou du ministère de l'Écologie, de Développement et de l'Aménagement durables

Dépôt légal : 1<sup>er</sup> trimestre 2008  
ISSN : 1263-2570  
ISRN : Certu/RE -- 08-09 -- FR

Certu  
9, rue Juliette-Récamier  
69456 Lyon cedex 06  
☎ (+33) (0) 4 72 74 59 59  
Internet <http://www.certu.fr>

centre d'Études  
sur les réseaux  
les transports  
l'urbanisme  
et les constructions  
publiques  
9, rue Juliette Récamier  
69456 Lyon Cedex 06  
téléphone: 04 72 74 58 00  
télécopie: 04 72 74 59 00  
[www.certu.fr](http://www.certu.fr)

## Certu

*Service technique placé sous l'autorité  
du ministère de l'Écologie,  
du Développement et de l'Aménagement durables,  
le Certu (centre d'Études sur les réseaux, les transports,  
l'urbanisme et les constructions publiques)  
a pour mission de contribuer au développement  
des connaissances et des savoir-faire et à leur diffusion  
dans tous les domaines liés aux questions urbaines.  
Partenaire des collectivités locales  
et des professionnels publics et privés,  
il est le lieu de référence où se développent  
les professionnalismes au service de la cité.*