

Master I *2021/2022*
Ingénierie des Logiciels Complexes (ILC)

Introduction aux
Systemes Complexes

Par : F. SAHEB
Email : sahebt2002@yahoo.fr

Quelques images!



Motivation

Dans notre quête de compréhension des phénomènes naturels caractérisés par la notion philosophique de l'être, ou artificiels caractérisés par la notion de l'intention d'être, nous sommes fréquemment confrontés aux problèmes de caractérisation de ces phénomènes communément qualifiés par la terminologie de *systemes complexes*.

Objectifs pédagogiques

- Comprendre et maîtriser l'évolution dans le temps de phénomènes réels ou artificiels.

Plan

1. Introduction aux systèmes complexes :
 - Définition de la notion de système complexe.
 - caractéristiques des systèmes complexes
2. Principes de modélisation.
3. Principaux mécanismes de simulation.
4. Principes de validation et de vérification du processus de modélisation et de simulation des systèmes complexes.
5. Systèmes Multi agents
5. Conclusion.

Les systèmes complexes

- représentent un ensemble aux contours difficilement identifiables en raison de l'ensemble relativement vaste des phénomènes physiques ou fictifs qui peuvent être regroupés par ce terme.

Les systèmes complexes



Définition du système:

Du Grec **systema** signifiant qui tient ensemble, mais avec l'idée d'union en un tout organisé voire stable.

D'autres définitions mettent pour la plus part l'accent:

- Soit sur les éléments composant le système.
- Soit sur les deux notions de totalité et de relation entre les éléments.

D'autres Définitions

■ ***Descartes en 1637***, dans le discours de la méthode illustre cette problématique en tentant d'éliminer l'aléatoire ou l'incertain :

« Conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusqu'à la connaissance des plus composés ».

■ ***Ferdinand de Saussure*** (linguiste suisse,
1857-1913) définit

« un système par une totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité ».

- **Ludwig Von Bertalanffy** (biologiste autrichien, 1901-1972), a été l'un des premiers à montrer qu'un système est un tout **non réductible** à ses parties. En 1950, il publie *The General System Theory*.

Il définit alors un système par trois critères fondamentaux:

- le nombre d'éléments,
- leur espèce
- et les relations qui existent entre ces éléments.

■ ***D'après [Slout et al., 1997],***

« un système est une population composée d'éléments d'une espèce unique avec des attributs bien définis. De plus, dans l'évolution spatiale et temporelle du système, si ces éléments ont des interactions ***non-linéaires***, alors de ces interactions peuvent émerger des comportements globaux ».

Introduisant la notion de finalité (celle de maintenir la structure et la pérennité(continuité) du système)

- **Joël de Rosnay** définit un système comme un ensemble d'éléments en ***interaction dynamique***, organisés en fonction d'un ***but***.

Définition de Complexe

- La racine latine du mot complexe est *plexus* signifiant *entrelacement* qui engendre

complexus: enchevêtrement, connexion, étreinte.

- Contrairement à l'idée reçue, le *contraire* de complexe *n'est pas simple* mais *implexe* qui caractérise une unité d'action indécomposable, irréductible à un élément unique.

■ Edgar Morin précise que:

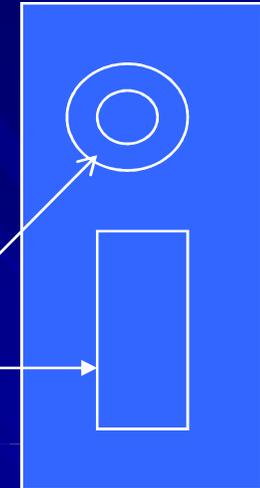
la complexité n'est pas la complication

■ et postule que ce qui est compliqué peut se réduire à un principe simple.

exemples



un organisme vivant est complexe dans le sens où il ne peut être décomposé et reconstruit à partir d'éléments simples et indépendants



Une voiture est un système très compliqué, mais démontable en un ensemble fini de pièces

complexité d'un système

De la notion de complexité d'un système peut résulter trois éléments :

- le degré élevé d'organisation,
- l'incertitude de son environnement,
- la difficulté, sinon l'impossibilité d'identifier tous les éléments et de comprendre toutes les relations mises en jeu.

***Joël de Rosnay* définit la complexité référent à un système par:**

- une grande variété des éléments,
- une organisation en niveaux hiérarchiques internes de ces éléments,
- une grande variété des liaisons entre ces éléments et la non-linéarité des interactions entre ces éléments
- et la difficulté voire l'impossibilité de dénombrer de façon exhaustive les éléments qui constituent ce système.

La notion de complexité implique par ailleurs celle:

- d'*imprévisible* possible,
- d'*émergence* plausible de nouveauté au sein du phénomène que l'on tient pour complexe.

systemes complexes et systemes compliques

Le Moigne et *Clergue* établissent également la distinction entre ces deux systemes.

- **Les systemes compliques** sont des systemes que l'on peut reduire en elements plus simples que l'on peut analyser separement pour comprendre le systeme global.

- **Dans le cas des systèmes complexes**, la somme des éléments fait émerger de nouvelles propriétés qui ne sont pas dans les éléments eux-mêmes.

Conclusion: Construit par l'observateur qui souhaite le décrire, un système complexe est par définition un système irréductible à un modèle compliqué.
il est complexe précisément parce qu'il tient pour certain l'imprévisibilité potentielle des comportements.

exemples

une société humaine est un exemple de système complexe. La diversité des interactions entre les éléments (individus), les groupes d'éléments par exemple sociaux t'elle qu'une famille, les multiples natures et spécialisations des éléments en font un système sur lequel les prédictions sont difficiles à réaliser.

Degré de complexité

- La notion d'ordre dans la complexité est une relation subjective.
- Le degré de complexité d'un système est souvent caractérisé par:
 - le nombre de niveaux d'organisation,
 - d'éléments par niveaux,
 - de relations entre les niveaux,
 - de relations entre les éléments par niveaux et
 - de la nature ou de la complication des relations.

Nombreuses définitions, partagent:

l'intégration d'un ordre, d'une organisation
et une hiérarchie observable, admettent :

- les caractères d'émergence,
- de finalité,
- d'interdépendance et
- d'interaction.

concepts fondamentaux

- **L'organisation** définie par l'agencement de relations, en niveaux hiérarchiques internes, entre les éléments (de natures diverses) qui composent le système.
- **L'interaction** définie par des relations entre les éléments d'un système complexe et peuvent être définies par un flux d'informations d'éléments du système ;
- **La globalité (ou totalité)** est définie par le fait qu'un système complexe est plus que la somme de ses éléments, et qu'il possède des propriétés que ses composants n'ont pas ;
- **La complexité** qui vise à articuler le tout et ses parties, le global et le particulier en un aller et retour incessant en eux (émergence et rétroaction) est caractéristique d'un degré élevé d'organisation et d'interactions difficiles à déterminer.

Les quelques caractéristiques et les propriétés d'un système complexe abordées au travers de ces définitions peuvent, enfin d'en appréhender le comportement, être mise en lumière par la description, plus ou moins formelle,

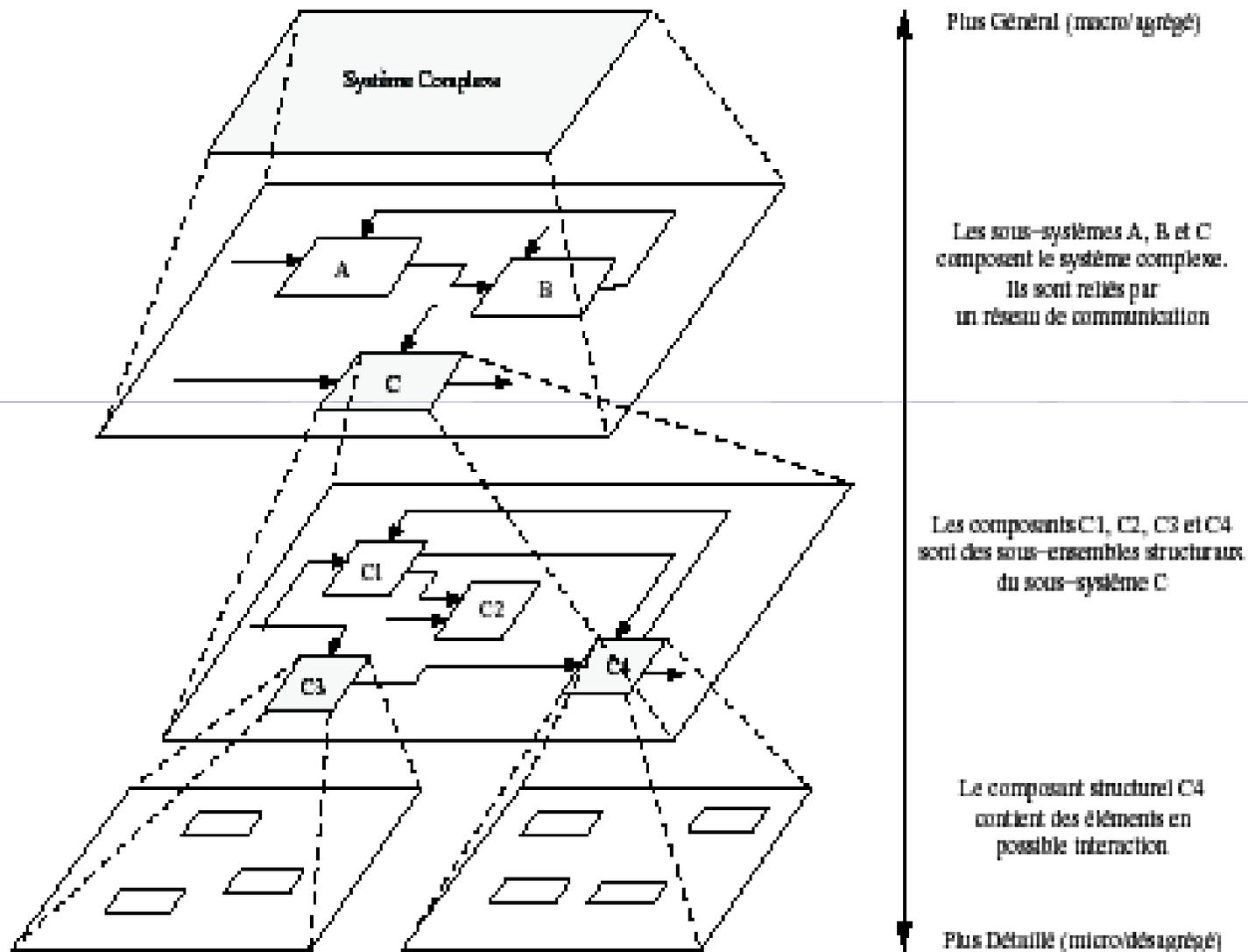
- de son *aspect structurel*,
- de son *aspect fonctionnel* et
- de *son aspect dynamique*.

Aspect structurel

L'aspect structurel décrit l'organisation des composants d'un système. Les principaux traits structureaux d'un système varient d'un domaine à un autre mais la structure représente généralement la partie stable du système et inclut, selon [de Rosnay, 1975] et [Forrester, 1980]:

- des éléments constitutifs,
- une limite ou frontière qui sépare la totalité des éléments de son environnement,
- un réseau de communication,
- des réservoirs(stocks).

Structure hiérarchique d'un système complexe



Éléments

Les éléments (ou entités) sont les parties constituantes d'un système, qui peuvent être :

- dénombrés de manière plus ou moins aisée.
- de natures diverses:
 - Hétérogènes,
 - assemblés de façon hiérarchique par catégorie.

Réservoirs

Les réservoirs sont des structures (sous-systèmes ou composants) dans lesquelles sont entreposés de l'information ou des éléments.

Réseau de communication

Les réseaux de communication permettant de:

- définir les interconnexions possibles entre les composants du système.
- D'agir ainsi comme un support permettant l'échange et le transport d'informations ou d'éléments :
 - entre les composants d'un système,
 - entre différents systèmes (existence possible de sous-systèmes)
 - ou entre un système et son environnement.

Composant/Sous système

■ Définitions:

- Un composant est un élément ou un ensemble d'éléments destinés à remplir une fonction particulière.
- un sous-système est une association de composants destinés à remplir une ou plusieurs fonctions opérationnelles au sein d'un système.

Limite d'un système

- Elle définit une frontière plus ou moins perméable entre la totalité des éléments et l'environnement extérieur et restreint le champ d'analyse au seul problème considéré.
- Peut parfois être floue ou encore mouvante par exemple lorsque l'on étudie des phénomènes sociaux de groupe.
- Peut être décomposée en une borne inférieure et une borne supérieure:
 - La borne supérieure définit la limite du niveau macroscopique, (les éléments organisés correspondant aux niveaux hiérarchiques supérieurs du système).
 - La borne inférieure définit la limite du niveau microscopique du système qui correspond à la limite de description des éléments simples.

Systeme ouvert vs Fermé

Définitions:

- Un système ouvert se définit par rapport à cette frontière, il s'agit d'un système possédant des interactions avec le monde qui l'entoure.
- Un système fermé n'échange aucune information avec son environnement extérieur.

Aspect fonctionnel

- Permet de décrire les corrélations (relations et interactions) entre les éléments du système et les changements avec le temps de ces éléments.
- Cet aspect du système évolue généralement plus rapidement que la structure.

Traits fonctionnels

Les principaux traits fonctionnels sont:

- des flux,
- des centres de décision,
- des ajustements
- et des boucles de rétroaction.

Flux

- Les flux représentent l'information ou les éléments circulant dans les réseaux de communication, entre les réservoirs dont ils font varier le contenu.

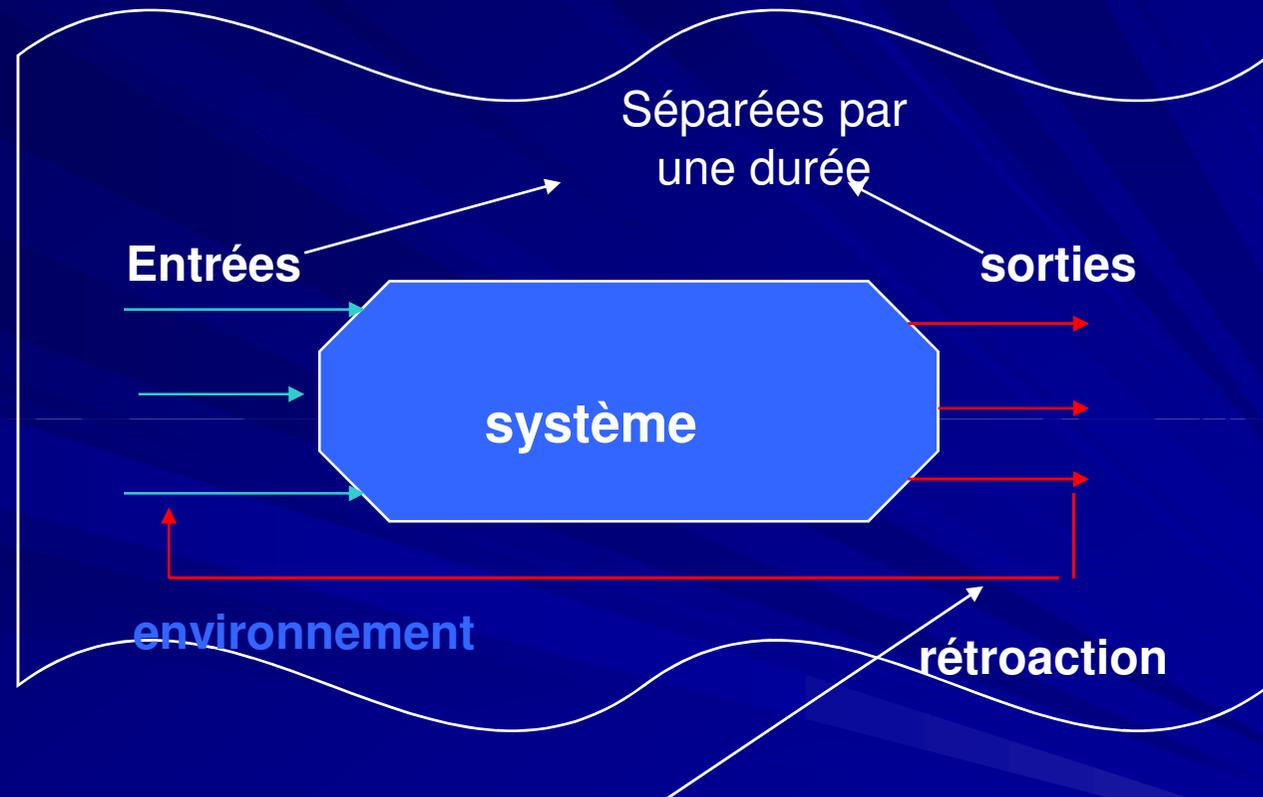
Centres de décision

- Les centres de décision (vannes) contrôlent et organisent le réseau de relations(coordonnent les débits des différents flux).

Ajustements

- Les ajustements (délais) résultent des différentes vitesses de circulation des divers éléments.
- Les délais ont un rôle critique dans les phénomènes d'amplification ou d'inhibition qui sont typiques du comportement des systèmes complexes.
- Ils permettent de procéder aux ajustements nécessaires à la bonne marche du système dans le temps (Un peu comme les réservoirs).

Boucles de rétroaction



Une rétroaction a lieu lorsque des informations sur les résultats d'une transformation sont acheminées à l'entrée du système (effet en retour).

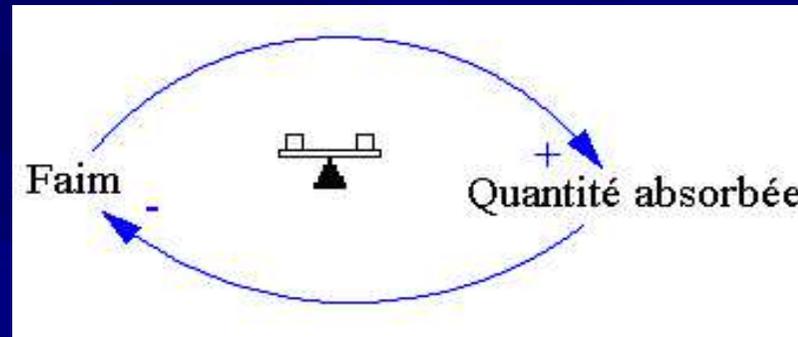
Boucles de rétroaction

On distingue deux types de boucles de rétroaction:

- les boucles positives dans lesquelles la réaction agit dans le même sens que l'action principale et
- les boucles négatives grâce auxquelles la réaction agit dans le sens opposé à l'action principale.

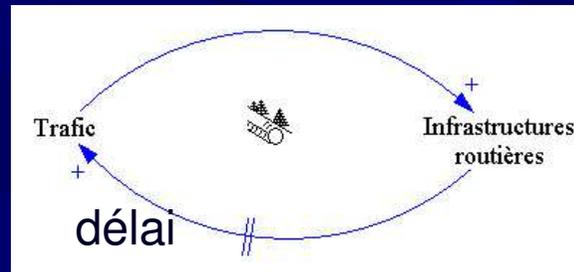
la boucle de rétroaction est une caractéristique typique des systèmes ouverts.

Exemples de boucles de rétroaction négative



* Le signe positif sur le diagramme indique que lorsque la variable "faim" croît, la quantité absorbée croît aussi. A l'inverse, le signe négatif indique bien que plus la quantité absorbée augmente, moins la sensation de faim se fait ressentir (en principe !).

Rétroaction explosive(positive)



De manière un peu simplifiée, si une route est régulièrement encombrée et qu'une voie supplémentaire est construite, dans un premier temps le trafic sera fluidifié. Mais à moyen terme cette infrastructure pourra revenir au même niveau de congestion car un nouveau trafic aura apparu, avec d'autres véhicules qui n'empruntaient pas auparavant cette infrastructure (ce trafic correspond à une augmentation de la mobilité des usagers). Dans le cas présent, le trafic conduit à construire plus d'infrastructures routières qui, à leur tour, génèrent du trafic, il s'agit donc d'une boucle explosive. Le délai est symbolisé sur le diagramme par deux petits traits sur la flèche, les retards dans les conséquences de certains événements constituent un autre élément essentiel de la Dynamique des Systèmes.

Conclusion

- Dans le premier exemple La multiplication des signes - et + conduit à -, il s'agit en effet d'une boucle négative.
- Dans le deuxième exemple, la multiplication des deux signes + donne +, il s'agit d'une boucle positive.

Aspect dynamique

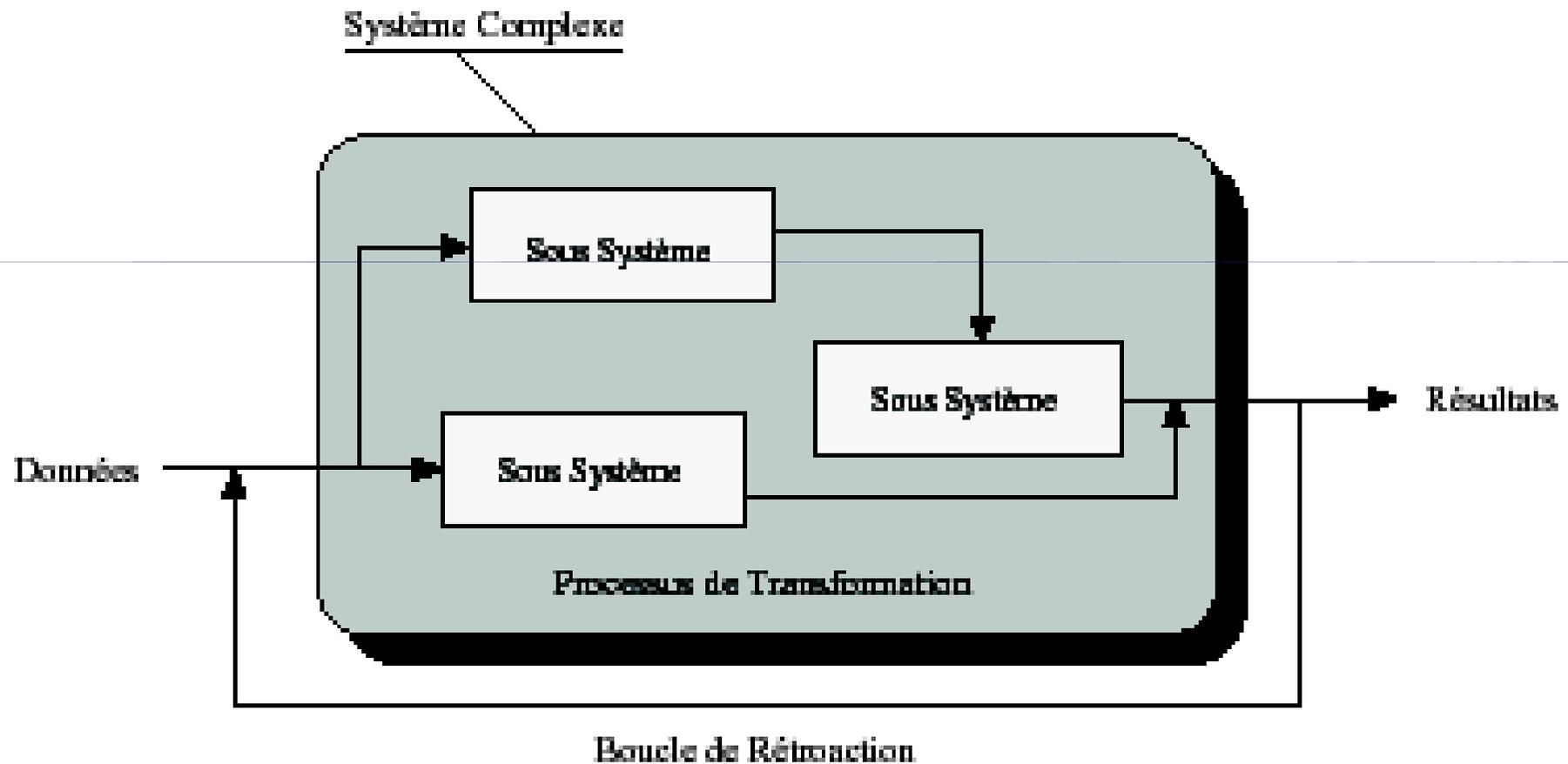
- La dynamique des systèmes, introduite par Jay Forrester dans les années soixante, est une méthode générale conçue pour analyser certains types de problèmes complexes.
- La méthode de la dynamique des systèmes postule que les boucles de rétroaction sont responsables des changements qui se produisent dans l'évolution temporelle du système.

- La dynamique d'un système repose sur l'action combinée des boucles de rétroaction, des flux et des réservoirs.
- Les interactions entre les réservoirs constituent une forme de rétroaction.
- Les transformations internes dues aux évolutions temporelles des réservoirs et des flux conduisent le système vers son objectif.
- Les différentes boucles de rétroaction agissent ensuite comme des perturbateurs ou des stabilisateurs vis-à-vis de cet objectif.

Exemple

- Le système de chauffage d'une pièce illustre parfaitement cette notion de boucle de rétroaction. Lorsque la température diminue jusqu'au-dessous d'une valeur réglée sur le thermostat, celui-ci réagit en chauffant la pièce. Lorsque la température de la pièce dépasse la température réglée sur le thermostat, celui-ci commande l'extinction du chauffage. L'action du thermostat influence le chauffage, dont l'activité influence elle-même le thermostat.
- Les rétroactions positives et négatives s'appliquent soit sur l'extérieur, soit à l'intérieur du système.

Dynamique d'un système complexe



Caractéristiques des boucles rétroactives négatives

- Les boucles négatives provoquent la dynamique du maintien (régulation) et accentuent la convergence vers un but préalablement défini.
- Les boucles négatives favorisent le maintien de l'équilibre, la stabilité du système en fonction des stimulus ou des perturbations extérieures et de son évolution propre.
- Un système homéostatique (i.e. qui résiste au changement) est un système capable de maintenir sa structure et ses fonctions par l'intermédiaire d'une multiplicité d'équilibres dynamiques.

- La rétroaction négative permet ainsi au système de conserver et de protéger son identité (fonctionnelle et structurelle), sa nature malgré les perturbations de l'environnement.
- Elle caractérise donc les systèmes ouverts qui conservent leurs structures et leurs fonctions intactes par l'intermédiaire d'équilibres dynamiques successifs.

Caractéristiques des boucles de rétroaction positives

- Les boucles positives provoquent la dynamique du changement d'un système et produisent un accroissement des divergences ou des écarts entre les objectifs du système et ses sorties.
- Une rétroaction positive favorise la croissance et l'évolution du système. Elle peut conduire par ailleurs à des changements de finalité et la recherche de nouveaux objectifs à poursuivre.
- L'évolution et l'émergence d'un système sont associés à la rétroaction positive c'est-à-dire à la capacité qu'a un système d'accéder à de nouveaux points d'équilibre, et à une nouvelle identité.

- La théorie des systèmes pose les bases d'une pensée de l'organisation des systèmes complexes dans laquelle il existe des propriétés émergentes qui naissent dans l'organisation d'un tout à partir des composants, et qui peuvent rétroagir sur les propriétés du système.
- Ainsi, l'organisation hiérarchique fonctionnelle et structurelle d'un système complexe et les interactions entre les éléments microscopiques qui le composent peuvent provoquer une émergence de nouvelles propriétés en provenance de différents niveaux inférieurs jusqu'aux niveaux d'organisation supérieurs conférant au système complexe la propriété de totalité.

- Joël de Rosnay présente les phénomènes liés à l'émergence de la complexité organisée, comme ceux que l'on peut observer dans des systèmes moléculaires (e.g. origine de la vie), les sociétés d'insectes (e.g. fourmilières, ruches), les systèmes sociétaux (e.g. entreprises, marchés, économies) ou les écosystèmes.
- Il précise que le fonctionnement global d'un système complexe conduit à l'émergence de structures, de fonctions et de propriétés nouvelles imprédictibles.

- **Ecosystème:** est l'ensemble formé par une association ou communauté d'êtres vivants et son environnement biologique, géologique, hydrauliques, climatique, etc..
- Les éléments constituant un écosystème développent un réseau d'échange d'énergie et de la matière permettant le maintien et le développement de la vie.

Concept d'émergence

...À suivre