

Chapter 1

Simulation et systèmes dynamiques.

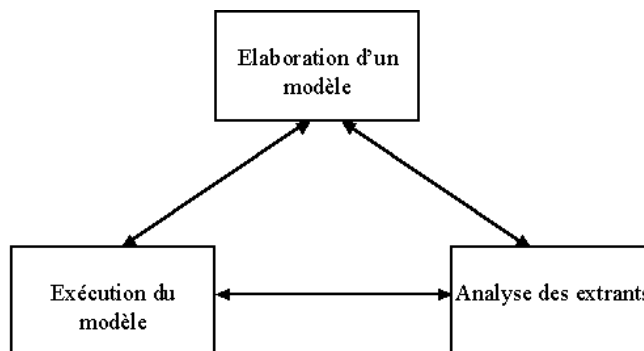
1.1 Sur la simulation en général.

Le terme simulation peut avoir plusieurs acceptions nous allons essayer de le cerner.

D'après Paul A. FISHWICK ¹ la *simulation informatique* est une discipline qui englobe

- l'élaboration d'un modèle d'un système physique théorique ou réel,
- l'exécution du modèle sur un ordinateur,
- l'analyse des extrants

C'est à dire que l'on peut résumer cette activité par le schéma suivant.



Sim1

La simulation incorpore le principe du "*learning by doing*", pour apprendre quelque chose sur un système on doit tout d'abord en construire un modèle puis opérer sur ce modèle.

¹[HTTP://-PUB.CISE.UFL.EDU/ ~ FISHWICK/INTROSIM/PAPER.HTML](http://-pub.cise.ufl.edu/~fishwick/introsim/paper.html)

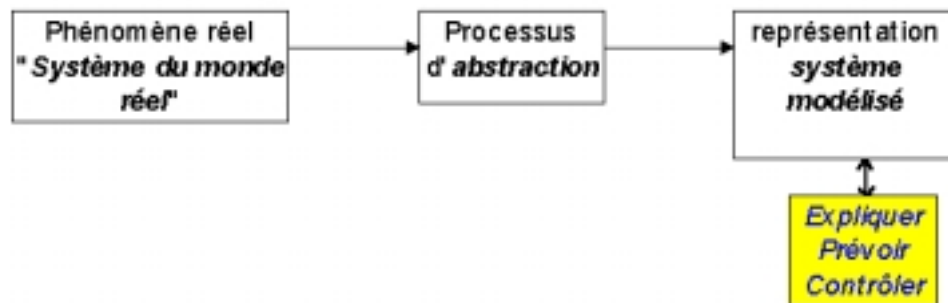
Pour comprendre la réalité et sa complexité on doit construire des objets artificiels et jouer de façon dynamique avec ces objets.

Pour représenter quelque chose de physique on doit tout d'abord créer un **modèle** de ce quelque chose.

Un modèle est

toute représentation (mentale, verbale ou écrite) d'un phénomène réel tel qu'un système, au sens large, ou processus.

On a le schéma de base



Sim2.

La notion de "système" (Cf infra) en elle même est un artefact, une construction de notre esprit.

Tout modèle utilisable représente un **compromis entre la réalité et la maniabilité**.

→ Doit être une représentation "raisonnable" du système réel ⇒ doit être "réaliste" en incorporant les principaux éléments des phénomènes à représenter.

→ Doit être maniable ⇒ apporte des points de vue ou des conclusions que n'offriraient pas des observations directes du système réel.

Obtention de la maniabilité ⇒ processus divers d'idéalisation.



Elimination des influences "étrangères" (celles sans rapports directs avec le phénomène étudié) + simplification des processus.

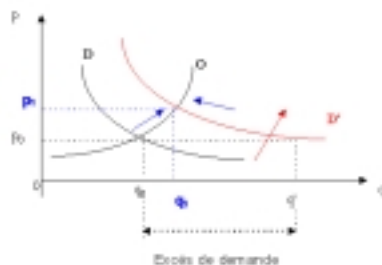
Trouver un bon équilibre entre le réalisme et la maniabilité est l'essence d'une bonne modélisation.

Un "bon" modèle → réaliste et maniable.

Un type de "mauvais" modèle $\rightarrow$ hautement réaliste mais si compliqué qu'il en devient intraitable.

A l'inverse on peut avoir un modèle très maniable mais tellement idéalisé qu'il en devient irréaliste (il ne tient plus compte des composantes importantes du système réel).

Il existe plusieurs **sortes de modèles**, la typologie la plus simple peut se résumer comme suit

Modèle verbal logique	La "main invisible" d'Adam Smith
Modèle physique	$\rightarrow$ Maquette baie du Mt St Michel $\rightarrow$ A.W. Philipps mécanisme hydraulique pour illustrer un modèle d'équilibre keynésien Mechanical Models of Economic Dynamics, Economica Vol. XVII Août 1950
Modèle Géométrique	
Modèle algébrique	Système d'équations $y = xA + \varepsilon$

Nous nous centrerons sur les **modèles algébriques** et notamment les **modèles de systèmes dynamiques**.

Cela étant on peut se demander **pourquoi recourir à la simulation en tant que technique** ? Il y a des méthodes de modélisation de systèmes qui n'impliquent pas la simulation, on se contente de résoudre un système d'équations (par exemple un système d'équations linéaires).

La simulation est souvent essentiel dans les cas suivants

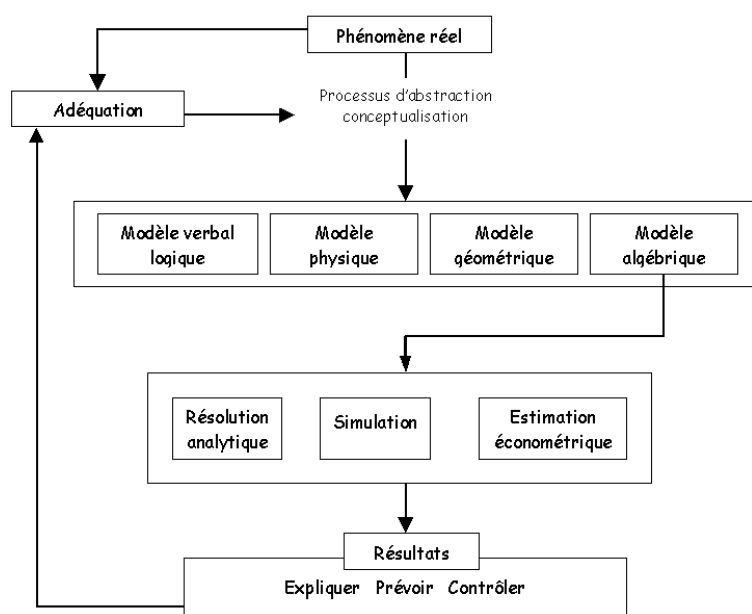
- 1** Le modèle est très compliqué avec de nombreuses variables et composantes en interaction.
- 2** Les relations sous-jacentes entre variables sont non linéaires.
- 3** Le modèle contient des variables aléatoires.
- 4** L'extrait du modèle peut être visualisé par exemple à l'aide d'une animation informatique.

La puissance de la simulation réside dans le fait que, même pour des systèmes linéaires aisément solubles, on peut utiliser une méthode de traitement uniforme pour traiter une grande variété de systèmes sans avoir recours

à un "sac à astuces" où l'on doit choisir des méthodes de résolution idoines et parfois ésotériques pour éviter la simulation.

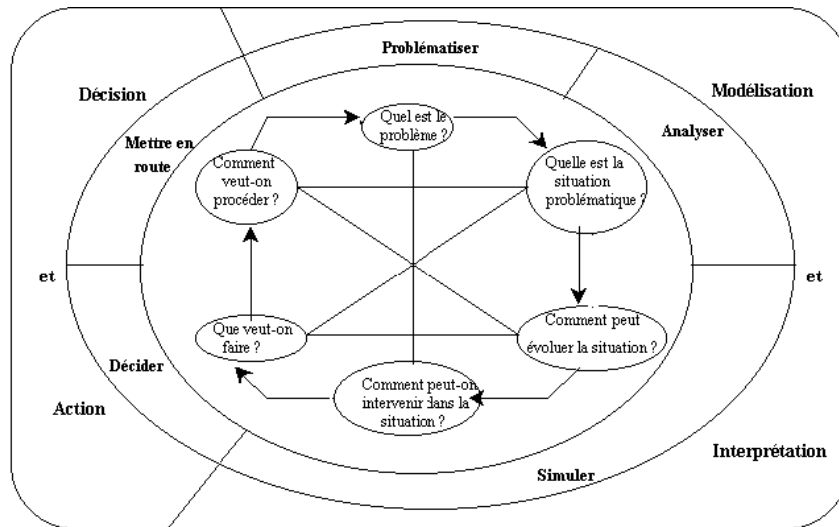
Un autre aspect important de la technique de simulation et que l'on peut construire un modèle de simulation pour reproduire un système existant. Si l'on utilise une approche "analytique" le modèle est parfois "tordu" pour être en adéquation avec la nature mathématique de la méthode de résolution plutôt que conçu comme un représentant fidèle du système réel. Un compromis harmonieux revient à utiliser une approche hybride englobant tout à la fois les méthodes analytiques et la simulation. On peut commencer par une approche analytique puis réaliser une extension en ayant recours à la simulation. Cette procédure évolutive est souvent très efficace.

On peut résumer ce qui vient d'être dit dans le schéma suivant.



Sim4.

En tant qu'outil la technique de simulation peut être considérée comme un aide précieux dans un processus de prise de décision. Bien souvent dans les organisations sociales complexes (entreprises, organismes d'état,...) on voit surgir des problèmes que l'on veut résoudre. La simulation peut et doit alors s'insérer dans un processus de résolution de problème. Celui-ci est résumé dans le schéma ci-après.



Sim5 : Processus de résolution de problèmes.

Le processus comporte **5 activités**

Problématiser (E1).	Définir le problème à résoudre.
Analyser (E2)	Approfondir l'examen du problème.
Simuler (E3 + E4)	Imaginer les modifications futures de la situation sous différentes hypothèses.
Décider (E5)	Choisir sur la base des analyses et simulations les stratégies et mesures à transposer dans les faits.
Mettre en route (E6)	Lancer effectivement les stratégies et mesures.

1.2 Sur les systèmes.

Face à un problème qui surgit dans une organisation, un système au sens large, on va essayer de modéliser ce problème pour mieux le comprendre, pour l'analyser pour le corriger. Pour ce qui nous concerne ici on va traiter de la **Simulation de Systèmes Dynamiques (SSD)**, celle des systèmes évoluant dans le temps.

1.2.1 Définition de base

Un système est un complexe de parties structurées en interaction dynamique, organisées en vue d'atteindre un ou plusieurs objectifs, compte tenu de certaines contraintes et réalisant un certain processus en liaison avec son environnement.

1.2.2 Environnement et frontière. Ouverture et clôture.

Tout système $\subset$ ensemble plus vaste (= environnement au sens courant.)

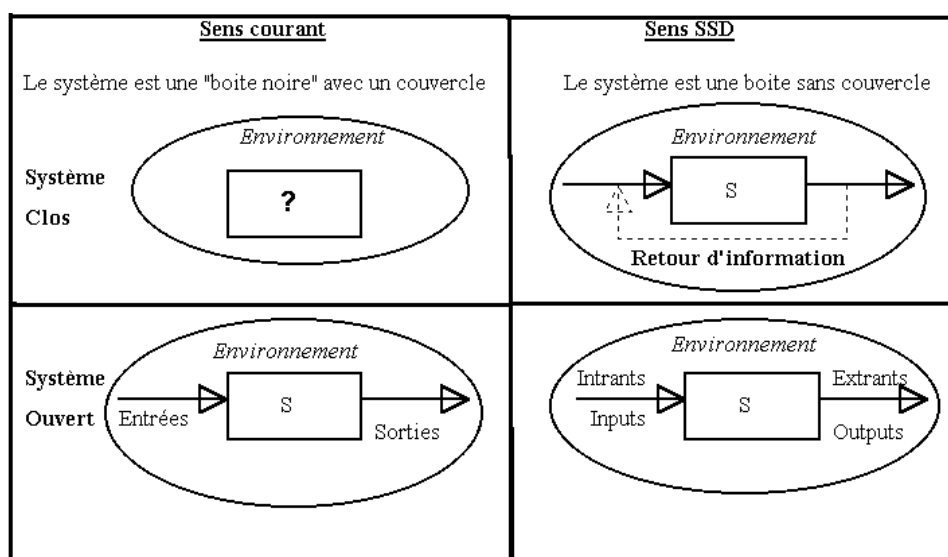
Délimiter un système = effectuer son *bornage*

Tout dépend du point de vue.

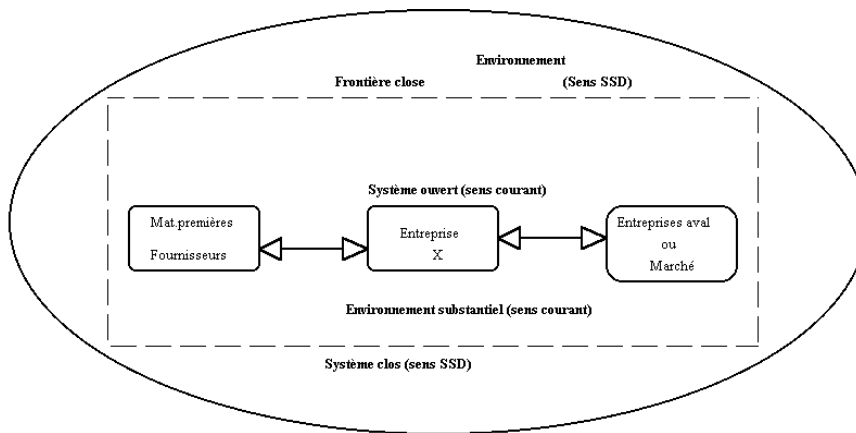
Frontière d'un système = ligne immatérielle (fruit de l'abstraction) permettant de séparer des éléments d'étude.



On rejettera dans l'*environnement* au sens de la SSD tout ce qui ne concerne pas le système considéré comme un tout organisé.



Sim6. Système ouvert/clos, senscourant/technique



Sim7. Illustration du principe modélisateur de la frontière close.

1.2.3 Structure d'un système et organisation.

Structure $\rightarrow$ analogie mathématique. $(E, *) \begin{cases} E = \text{ensemble d'éléments} \\ * = \text{"loi"} \end{cases}$

La structure d'un système est la résultante de la conjonction indissoluble d'éléments significatifs (ayant chacun un rôle propre) ou unités actives et de lois ou relations liant ces éléments entre eux.

Le comportement d'un système est le fruit de sa structure.

C'est aussi

l'image de son évolution interne vue de l'extérieur

Au total on a l'égalité mnémotechnique :

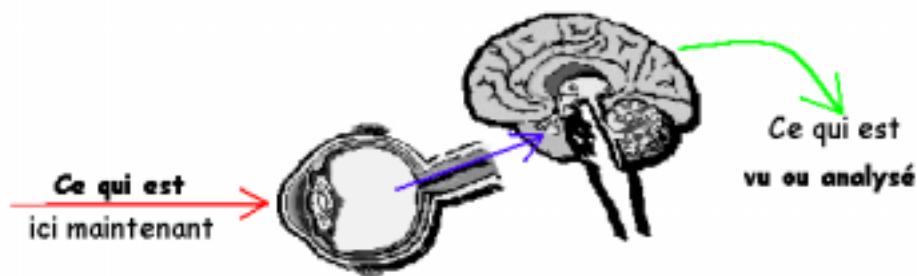
$$\text{Organisation} = \text{Structure} \oplus \text{Comportement}$$

1.2.4 Structure et observation.

Tout système, objet d'étude et d'observation ne peut se définir que relativement aux préoccupations de l'observateur qui fait partie du système ou de son environnement.

L'observateur, par un **processus de conceptualisation**, transforme le **système du monde réel** en un **système modélisé**, ne retenant que ce qui l'intéresse ou que ce qu'il perçoit en fonction de ses schémas de pensée.

Vision ou abstraction ?



Sim8.

Chaque chercheur, même se voulant le plus “objectif” possible introduit son équation personnelle dans sa recherche et son analyse. L'observateur est toujours une personne bien déterminée. Il existe toujours une **composante subjective** de l'observateur qu'il faut chercher à gommer, pour autant que faire se peut.

Par ailleurs face à des **systèmes complexes** l'observation n'est pas simple.

On peut confondre causes et symptômes, prendre la proie pour l'ombre.

1.3 Principes systémiques.

1.3.1 Composantes atomiques de structure, niveaux et flux.

Les deux grands types de composantes.

$$Structure \rightarrow \left. \begin{array}{c} \text{Eléments} \\ \text{Lois} \end{array} \right\} \rightsquigarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{Niveaux} \\ \text{Flux} \end{array} \right. \leftarrow SSD$$

“ Pour décrire une réalité, même fort complexe, il est nécessaire est suffisant de disposer de deux sortes de variables : les niveaux et les flux, non compte tenu des constantes ”

$\updownarrow$
Analogie hydraulique

Niveau $\rightarrow$ *Variable d'état* $\rightarrow$ *Réservoir*

Flux $\rightarrow$ *Variable d'action* $\rightarrow$ *flux ou vanne*

Exemples.

Comptabilité		
Bilan	niveau	Etat financier d'une entreprise à un moment donné
Compte de résultats	flux	Passage d'un bilan à un autre

Entreprise <i>E</i>		
Niveaux	Stocks de matières premières Stocks de produits finis	Nombre d'employés Nombre de machines
Flux	Flux de marchandises allant des stocks aux clients	Flux de commandes Flux des règlements

Règle empirique pour distinguer les niveaux et les flux.

Les flux sont des variables d'action, ils cessent donc d'exister lorsque l'action s'arrête. A l'opposé les niveaux représentent des accumulations d'effets d'actions passées, ils continuent d'exister lorsque l'action s'arrête.

Test simple face à un système observé $\rightarrow$ imaginer que toute activité cesse

$\downarrow$

Les seules variables alors observables sont des variables de niveaux.

$\updownarrow$

Niveaux $\rightarrow$ Apparaissent sur la “ **photographie** ” d'un système.

Flux $\rightarrow$ N'apparaissent que sur un “ **film** ”

Mise en garde.

“ *Flux et niveaux ne se distinguent pas par les unités de mesure* ”.

MAIS

Niveau mesuré en “unités de quantités” $\Rightarrow$ flux agissant en $\frac{\text{Unités de quantités}}{\text{Unité de temps}}$

1.3.2 Principes régissant flux et niveaux.

Pr1 : Les niveaux sont des intégrations. Ils intègrent (ou accumulent) les résultats d'actions dans un système. Les variables de niveau ne peuvent changer instantanément.

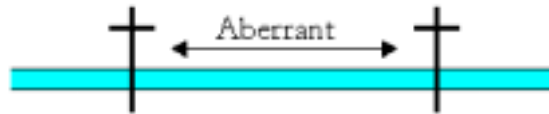
$$\int \text{ou réservoir}$$

Pr2 : Les niveaux sont seulement modifiés par des flux.



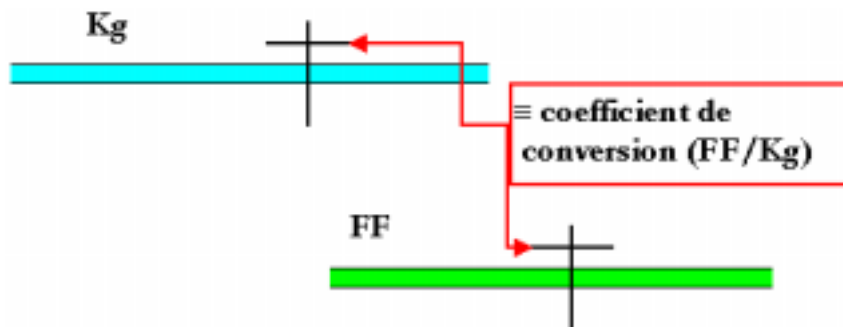
Sim9.

Pr3 : Les flux dépendent seulement des niveaux et de constantes. Aucune variable de flux ne peut dépendre directement d'une autre variable de flux.



Sim10.

Mais

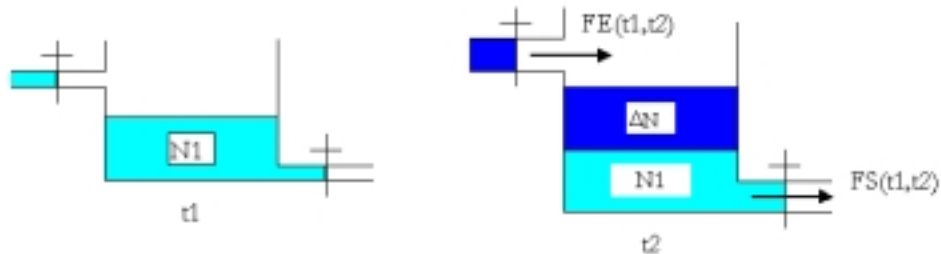


Sim11.

Pr4 : Les flux ne sont pas instantanément mesurables. Aucun flux ne peut, en principe, en influencer un autre si ce n'est par l'intermédiaire d'un calcul de moyenne, c'est à dire d'un niveau.

Pr5 : Variables de niveau et variables de flux doivent alterner.

Schéma résumé.



Sim12 Relation flux niveau dans l'analogie hydraulique.



Relation fondamentale en SSD = équation de niveau

$$N_2 = N_1 + (FE - FS)_{t_1}^{t_2} = N_1 + [\Delta(N)]_{t_1}^{t_2}$$

1.3.3 Objectifs et normes.

Un système est un objet actif $\Rightarrow$ il tend vers un ou plusieurs objectifs.



2 visions des objectifs d'un système

On constate que le système à un certain objectif	On considère un système comme un opérateur de transformations réalisant un certain processus à gérer au mieux
vision "descriptive"	vision "normative".



La finalité du système sera le respect par ses sorties de certaines normes	
Ponctuelles.	x
Fourchettes	$[x, y]$
Fonctions du temps	Programme Programme adaptatif.
Quantitatives ou Qualitatives	

Les 2 grands types d'objectifs

Objectifs propres (aspect descriptif)	Objectifs que l'on assigne (aspect normatif)
Perçus à la suite d'une étude approfondie du comportement du système observé.	<i>"Le choix (de ces objectifs) oscille souvent entre une sorte de "science fiction" décisionnelle - où les objectifs ont à cœur de dessiner une vision socialement agréable du système étudié - et un alignement passif sur l'observation des tendances du passé." Y.Barel</i>
Sont inhérents au système $\Rightarrow$ analyse fine	Etape ultérieure de l'étude. Modélisation en vue de prévoir et d'agir au mieux.

Subordonner la vision normative à la vision descriptive



Avant de chercher à représenter ce qui devrait être il est nécessaire de savoir ce qui est.

Mises en garde de Jacques Popper.

“ ...les objectifs d’un système quelconque (organisation, cellule biologique,...) sont souvent multiples, difficiles à distinguer les uns des autres, et contradictoires dans leurs conséquences ultimes. ”

“ Dans le cadre d’une grande organisation , les objectifs ne sont pas toujours clairement définis, et les sous-objectifs sont souvent en conflit, *état de fait qu’il peut être prudent de ne pas chercher à expliciter* ”

1.3.4 La notion de commande. Régulation et pilotage.

Les systèmes complexes se **contrôlent eux-mêmes**.

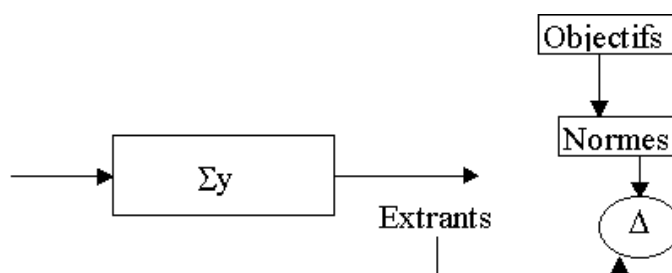
Capacité d’auto-organisation ou **capacité de commande**.

Ecosystème naturel

Conserve la stabilité dynamique de son organisation

≡ **système homéostatique**

Système social



Sim13.

Faire intervenir une sorte de “maître du jeu” compensant ou éliminant les causes de l’écart.

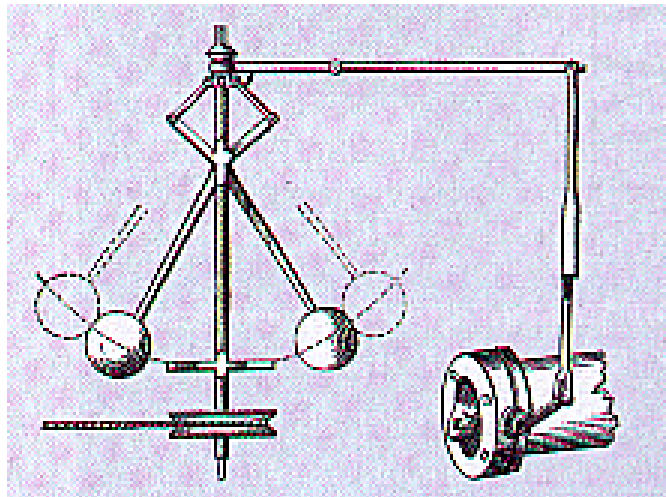


Maître du jeu = organe de commande.

La commande est partie intégrante du système

[Système de Décision $\subset$ Système]

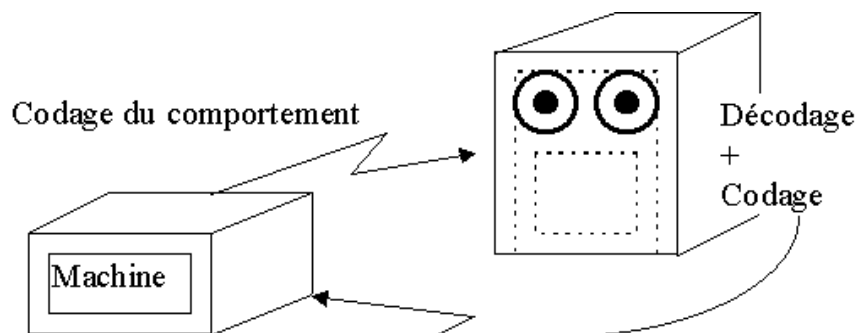
Dans le cadre des paradigmes thermodynamique et cybernétique on a mis à jour deux types de processus de contrôle des machines. la régulation et le pilotage.



Sim14. Régulateur à boules de James Watt
Régule la production de la vapeur par la vapeur elle-même

“ La régulation consiste en une rétroaction informationnelle qui prend sa source dans la constatation d’un écart par rapport à un objectif, une norme souhaités. ”

Wiener et la cybernétique → pilotage. traitement d’information.



Sim15.

“ Le pilotage suppose un traitement de l’information, il sert à diriger l’entité pilotée vers des objectifs donnés. Il passe par l’intermédiaire d’un élément de pilotage, censé être informé complètement sur l’entité dirigé et possédant des sous programmes d’action. ”

Pb du succès du pilotage dans le cadre de systèmes complexes.

—> Les accidents nucléaires type Three Mile Island ou Tchernobyl fournissent des exemples de risques majeurs dus à une erreur de codage. Les tableaux de contrôle indiquaient, entre autres, qu'une vanne de refroidissement était ouverte alors qu'en fait elle était fermée.

—> Dans le cadre de systèmes complexes ouverts le risque est encore plus grand puisqu'on ne peut pas prévoir toutes les perturbations, aussi bien externes, qu'internes par interaction. On ne peut pas appréhender en même temps toutes les données nécessaires à un pilotage parfait.

↓

Associer les deux types de contrôle

$$Commande = Pilotage + Régulation$$

$$Commande \Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} \text{recensement} \\ \text{transformation} \\ \text{transmission} \\ \text{traitement} \end{array} \right\} \text{ de l'information.}$$

Ces processus de contrôle reposent sur le **principe de la rétroaction**.

En général la convergence vers un but se fait par le biais de **boucles de rétroaction négatives**. Celles-ci ont un effet stabilisateur.

Les données informationnelles recueillies et réinjectées ont pour effet une action inversée de l'action originelle.

En SSD

Une équation de flux est un énoncé de politique.

Elle montre comment est engendré un "courant de décision" ou "courant d'action"

↑

"équation de flux" $\equiv$ "politique"

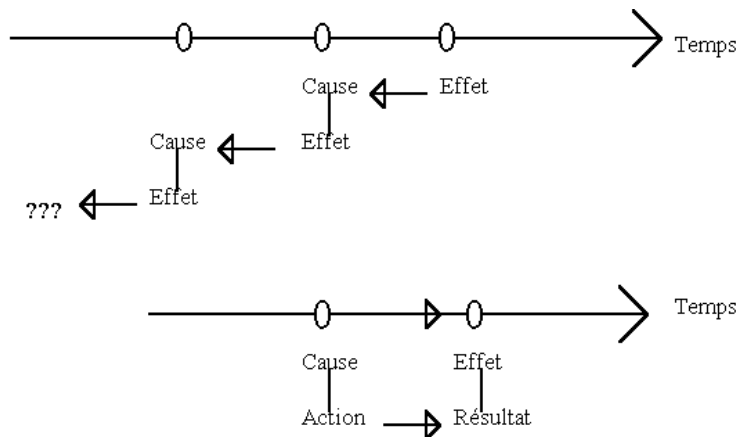
↑

Décrit la façon dont l'**information disponible** est utilisée
pour engendrer des décisions.

↑

" les équations de flux disent comment le système s'auto-contrôle "

1.4 Boucles de rétroaction en réseau. Processus de rétroaction.

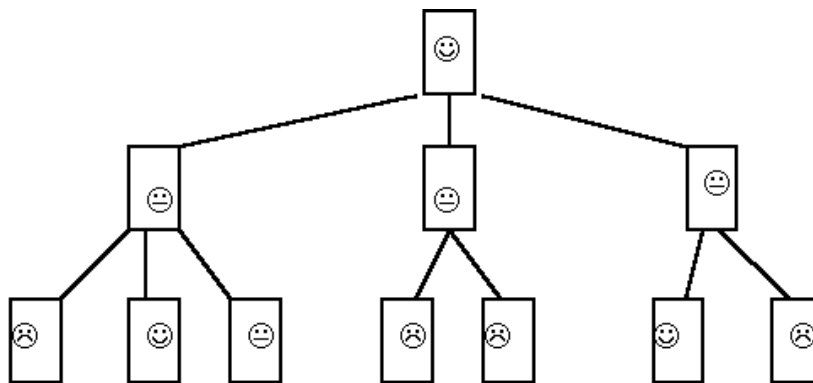


Sim16 : Les cheminements de la pensée monocausale.

Mais une cause unique peut provoquer plusieurs effets différents, lesquels, à leur tour en amèneront bien d'autres.



Chaîne causale ramifiée qui se traduit par un “arbre de décision”.



Sim17 : Hiérarchisation monocausale dans une entreprise.

Fondamentalement les comportements au sein d'un système complexe ayant une structure en réseau sont le fruit d'un réseau de relations causales entre éléments composants, qui donne naissance à des boucles de rétroaction (*feedback loops*)

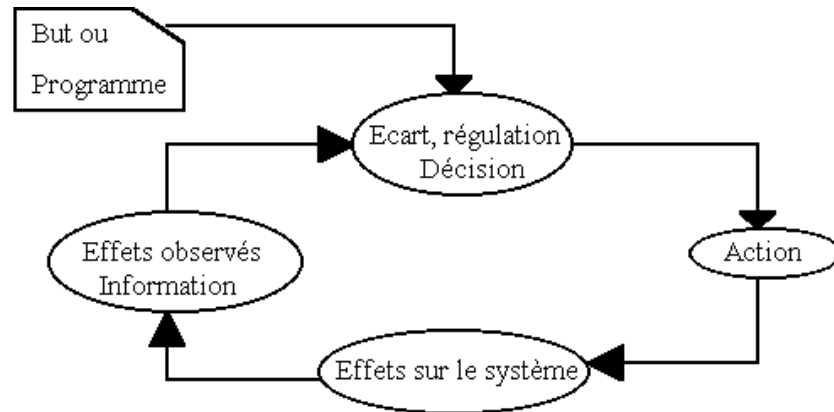


A la chaîne linéaire causale il est préférable de substituer un réseau de boucles



La boucle n'a ni début, ni fin, la composante d'où part une impulsion initiale est à son tour modifiée elle-même. Et l'on peut avoir ainsi plusieurs bouclages

Type fondamental de boucle de rétroaction → boucle **IDA** (**I**nformation, **D**écision, **A**ction).



Sim18 : La boucle de rétroaction fondamentale IDA.

Ce type de boucle de rétroaction est l'élément "moléculaire" fondamental de tout système, niveaux et flux formant les éléments "atomiques".

On peut dire que

$$A = \mathcal{A}(B - I)$$

où

A = Action

B = But

I = Information

$\mathcal{A}$ = relation fonctionnelle disant

comment on "traite" la quantité $(B - I)$

Exemple

$$FC = \frac{1}{TA} (SD - S)$$

$$\text{Flux de commande} = \frac{\text{Stock Désiré} - \text{Stock existant}}{\text{Temps d'ajustement}}$$

TA = "délai de temps" (unités de temps usuel du système modélisé)

$\mathcal{A}$ est représenté par l'opération $1/TA$

1.4. BOUCLES DE RÉTROACTION EN RÉSEAU. PROCESSUS DE RÉTROACTION.21

Dans un réseau de boucles il faut chercher à savoir quels sont les
caractères des effets des éléments les uns sur les autres.

↓

On commence par étudier l'action isolée d'un élément *A* sur un élément *B*,
tout en sachant que *A* et *B* font partie d'un ensemble plus vaste.

2 types d'effets fondamentaux

les effets de même sens, (positifs)
les effets de sens contraire (négatifs)

↓

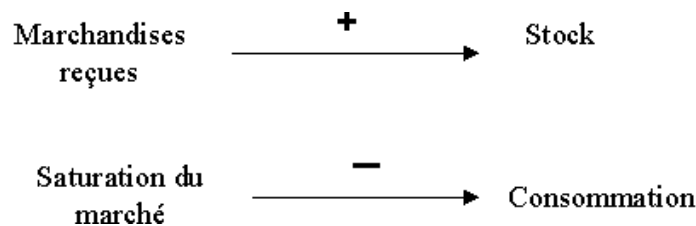
Diagrammes fléchés (diagrammes de structure causale)

Les flèches servent à traduire une relation de cause à effet entre deux
éléments.

La **flèche** indique le **sens** de l'influence.

On affecte un **signe** à la flèche pour dire si la **causalité** est

■ **Positive (+)** : une variation dans un sens de la variable de départ
engendre une variation de même sens de la variable d'arrivée
■ **Négative (-)** : une variation dans un sens de la variable de départ
engendre une variation de sens opposé pour la variable d'arrivée



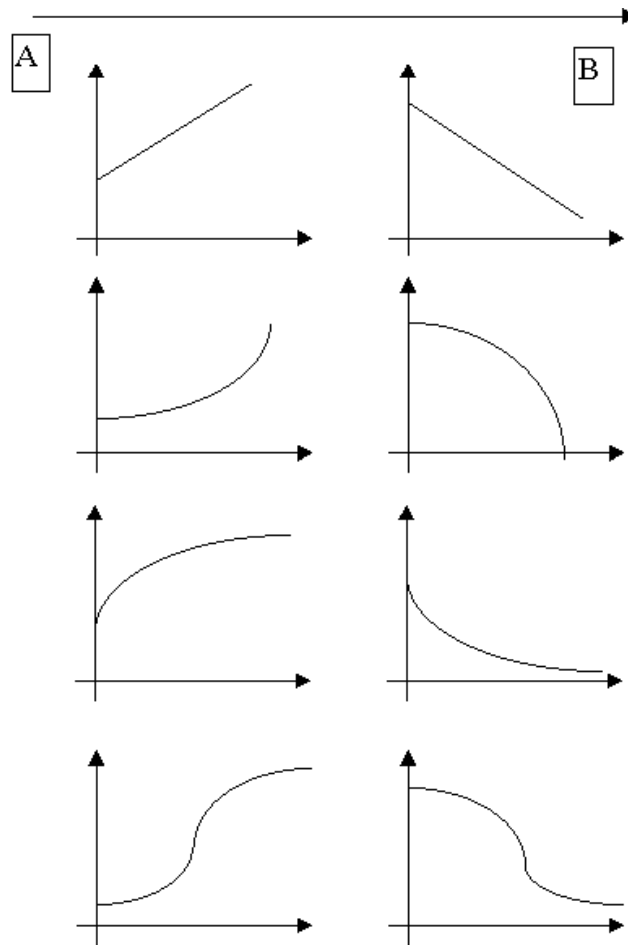
Sim19 : Caractérisation de relations causales.

L'**intensité** d'une action varie selon les cas.

La relation entre A et B peut se traduire par une relation fonctionnelle :

linéaire, affine, exponentielle, logistique, ou tout autre.

[En SSD ce type d'effet peut être décrit à l'aide de fonctions
portant le nom de **modulateurs**]



Sim20 : “ Intensités ” de relations causales.

Troisième différenciation.

Une action de A sur B nécessite du temps.

↓

∃ interactions lentes ou rapides.

↓

Des fonctions SSD permettent de modéliser les décalages de temps plus ou moins prononcés.

(A,B) ⊂ **réseau de boucles.**

Pour caractériser les relations causales, nous avons raisonné en termes binaires

utilisant la clause “ toutes choses égales par ailleurs ”.

↓

Abandon de cette vision réductionniste des choses
à partir du moment où les relations binaires sont “raboutées”
pour donner naissance aux boucles de rétroaction dont elles sont les
composantes.

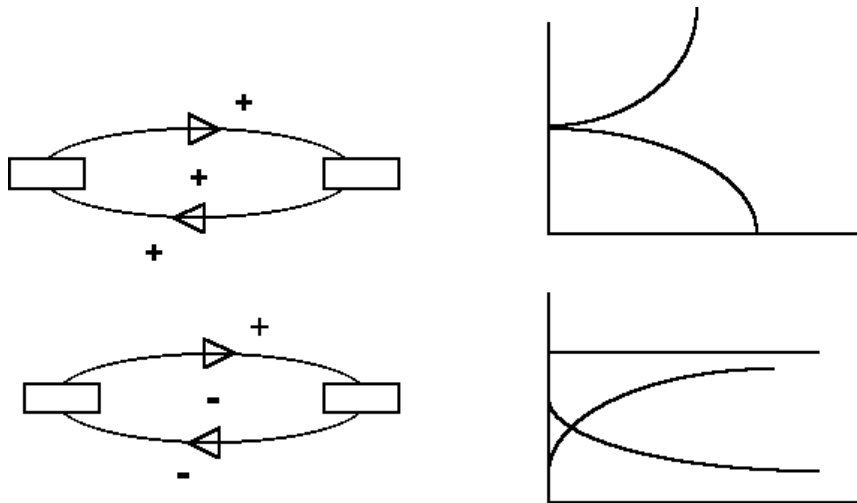
∃ 2 grands types de boucles de rétroaction

1 La *boucle de rétroaction positive* ($RA+$), lorsqu’on parcourt la boucle, l’effet initial crée une cause finale, sur l’élément de départ, de même nature agissant dans le même sens. C’est l’effet “boule de neige”.

La rétroaction positive a des **effets cumulatifs**. Elle est génératrice d’évolution.

2 La *boucle de rétroaction négative* ($RA-$), lorsqu’on parcourt la boucle, l’effet initial crée une cause finale, sur l’élément de départ, qui va agir en sens inverse.

La rétroaction négative a un **effet stabilisateur**, elle est synonyme de convergence vers un but.

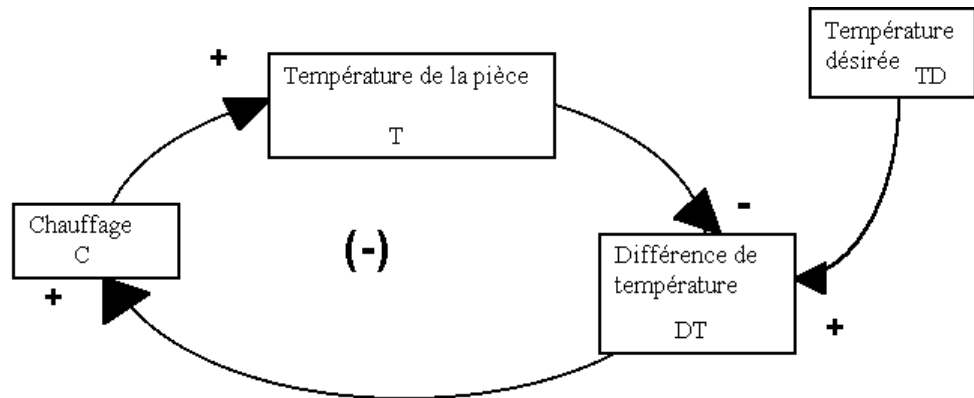


Sim21 : $RA+$, $RA-$ et comportements temporels associés.

Dans le cas d’un système complexe il existe une multitude de boucles positives ou négatives. Dans une certaine mesure les boucles négatives tendent à compenser les effets des boucles positives pour amener le système vers un éventuel état de stabilité. A terme une boucle positive peut voir ses caractéristiques régénératrices déprimées par le jeu des boucles négatives agissant sur elle.

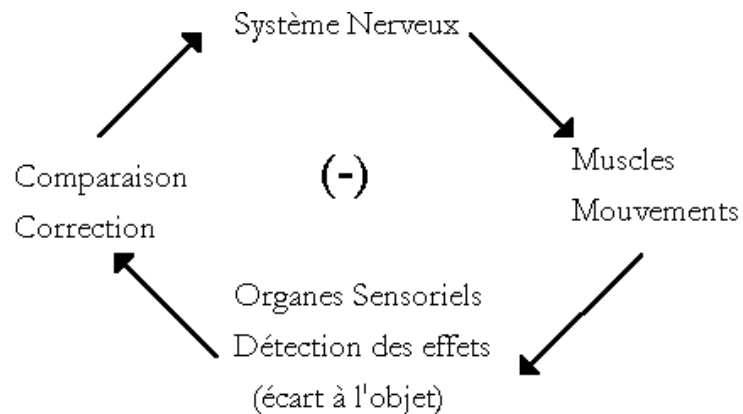
Exemples.

Exemple 1 : système de régulation thermostatique de la température d'une pièce.



Sim22 : Rétroaction négative, régulation thermostatique.

Exemple 2 : mouvement de préhension



Sim23 : Rétroaction négative et mouvement de préhension.

Variable principale = **écart entre la main et l'objet à saisir.**

La boucle est négative puisque par bouclages successifs on tend à diminuer cet écart à faire converger la main vers l'objet.