



# Systemique et approche système

## Ingénierie et intégration des Systèmes

Yann Pollet

CNAM

Chaire d'intégration des systèmes

# L'approche système

- Introduction à la théorie des systèmes
  - Variété, entropie, information
  - Rétroaction
  - Contrôle des systèmes
- Éléments sur les systèmes
  - systèmes et environnement
  - systèmes et sous-systèmes
  - systèmes et temps
  - complexité
  - pilotage des systèmes
- L'approche système

# Systemique et approche système

- Étude des principes « abstraits » d'organisation des systèmes complexes
- De manière indépendante de la nature physique des entités : physique, technologique, sociale, biologique..., combinaisons
- But de compréhension, modélisation, prévision, conception de système
- Etude des systèmes qui tendent vers un but malgré les perturbations  $\Rightarrow$  **systèmes finalisés**

# Bref historique

- Les prémisses : Platon, ...
- Contrôle des systèmes, asservissements (1940...)
- Norbert Wiener, 1948 : Cybernétique
- Claude Shannon : Théorie de l'Information
- Ludwig Von Bertalanffy, 1950 : Théorie Générale des Systèmes : tentative de fondation d'une science transdisciplinaire
- Idées assimilées ou redécouvertes par d'autres disciplines : autonomie, auto-organisation, adaptation, complexité, ...
- « Approche système » pour appréhender des phénomènes complexes

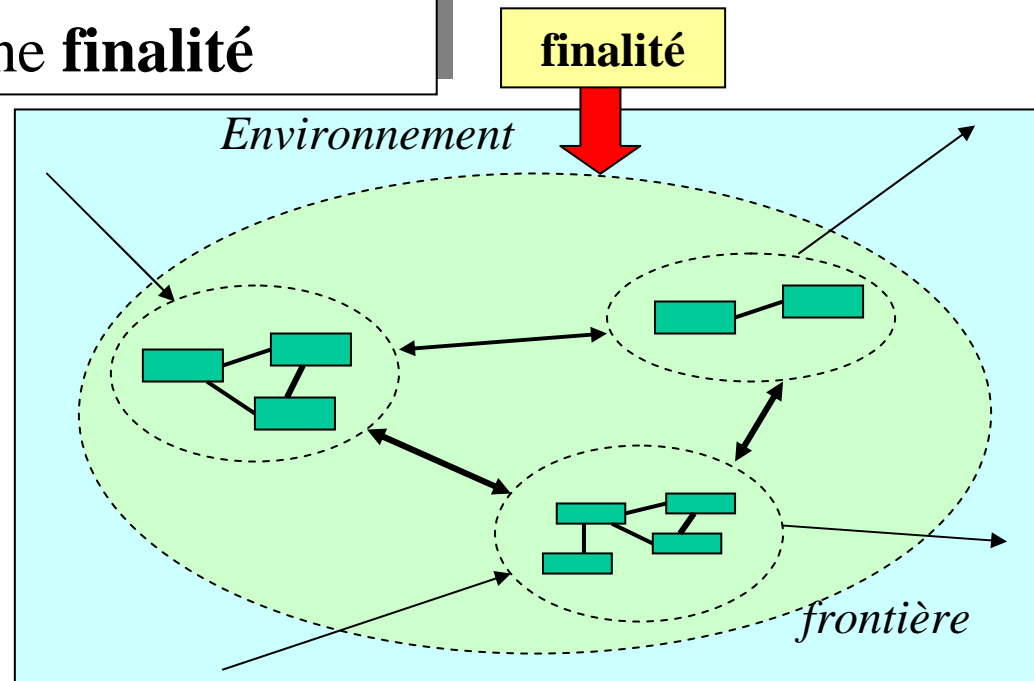
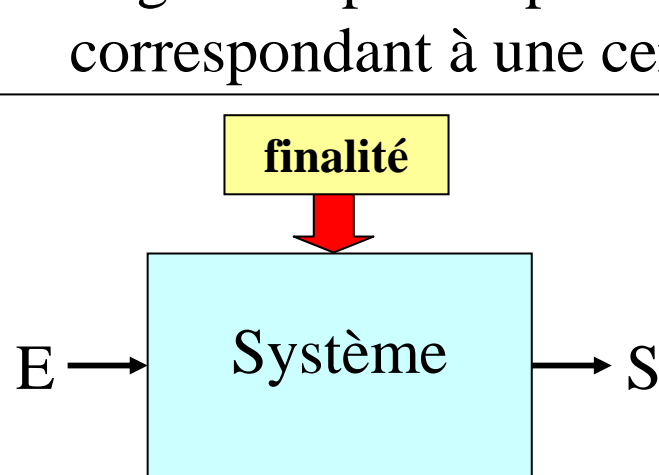
# Concept de relation

- Etude des propriétés indépendantes de la nature concrète des composants et des phénomènes
- Concepts de structure, d'organisation, de contrôle, de hiérarchie, ....  $\Rightarrow$  étude des **relations** entre éléments physiques
- Intérêt pour certains aspects de la réalité à l'exclusion d'autres
- Etude des manifestations concrètes de principes plus généraux (Phénomènes  $\Rightarrow$  Lois physiques  $\Rightarrow$  Principes)
- Appréhension des systèmes par le biais de **modèles**, rendant compte d'un aspect particulier de la réalité

# Notion de système

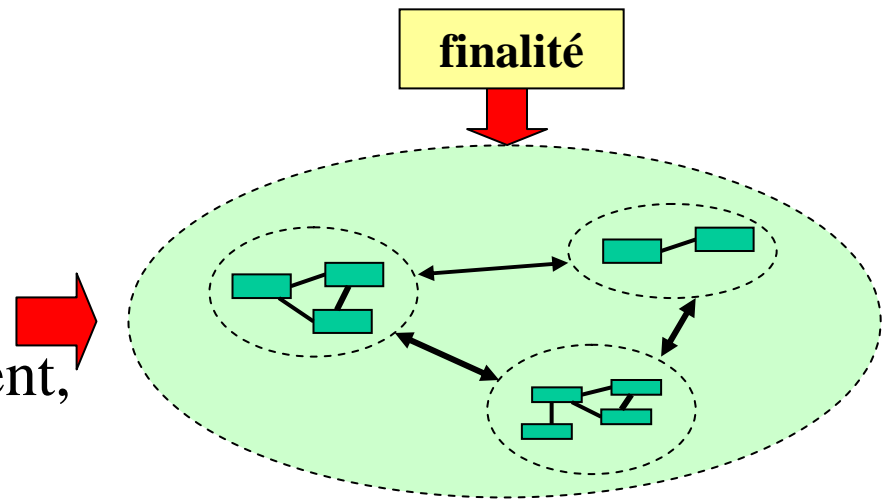
- Ensemble **composite** constitué de personnels, de matériels, de logiciels, de procédures
- En **interaction** mutuelle
- Dans un **environnement** donné
- Organisés pour répondre à un **besoin** correspondant à une certaine **finalité**

- Ensemble d'éléments
- Ensemble d'interactions internes
- Ensemble d'interactions externes
- Ensemble de buts

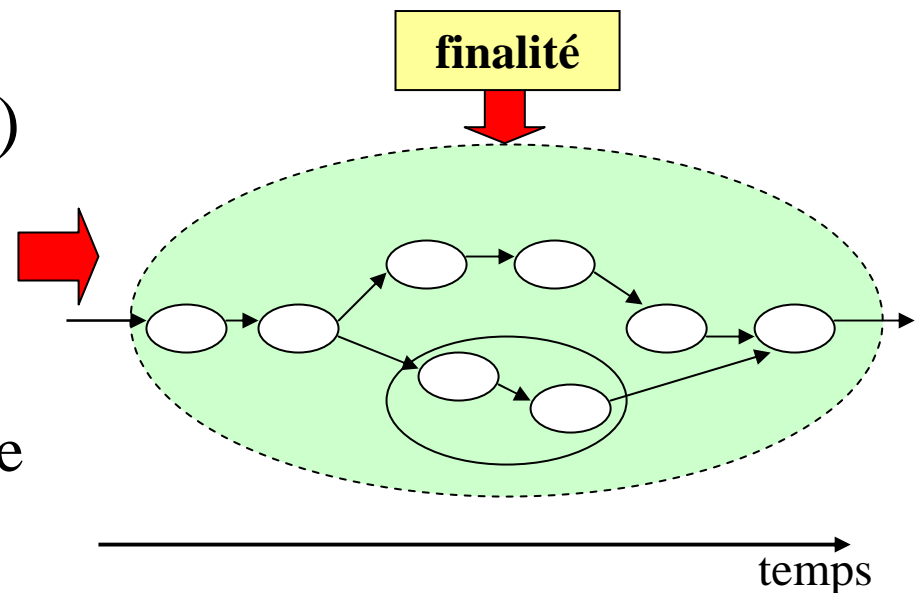


# Définitions duales d'un système

- Vue structurelle (spatiale)**  
 ensemble de constituants en interaction mutuelle et en interaction avec l'environnement, organisés en fonction d'un but



- Vue dynamique (temporelle)**  
 ensemble de processus coordonnés entre eux et synchronisés avec l'environnement pour atteindre un objectif



# Propriétés des systèmes

## Définition

**ensemble de constituants**  
unité cohérente

**organisés**  
structure interne

**en fonction d'un but**  
objectifs, finalité

**immergé dans un environnement**  
sur-système

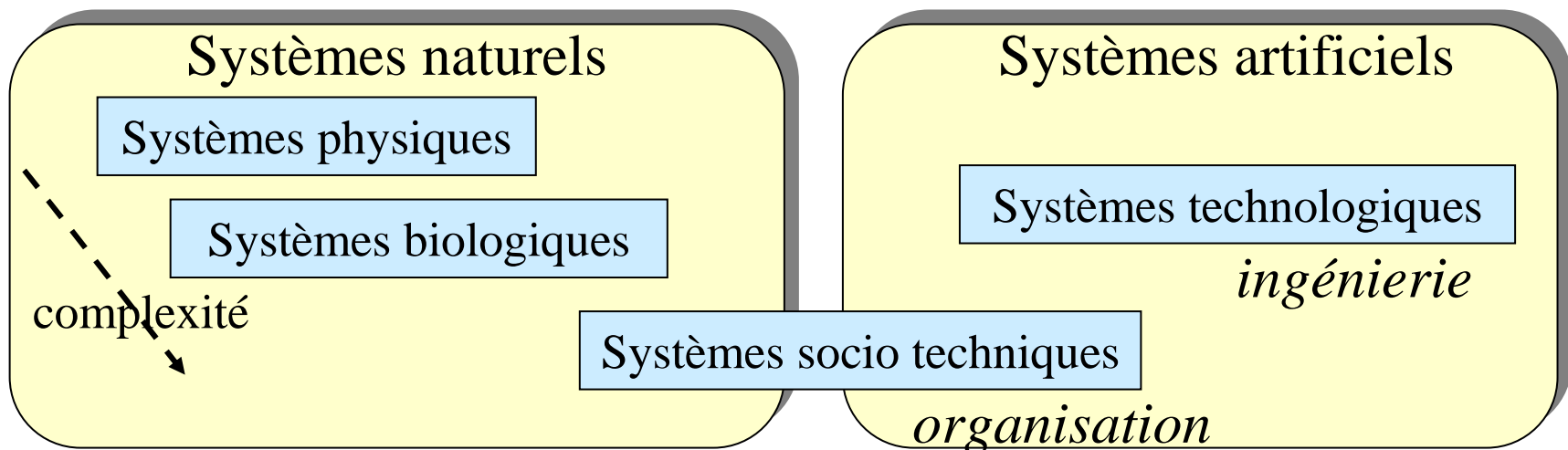
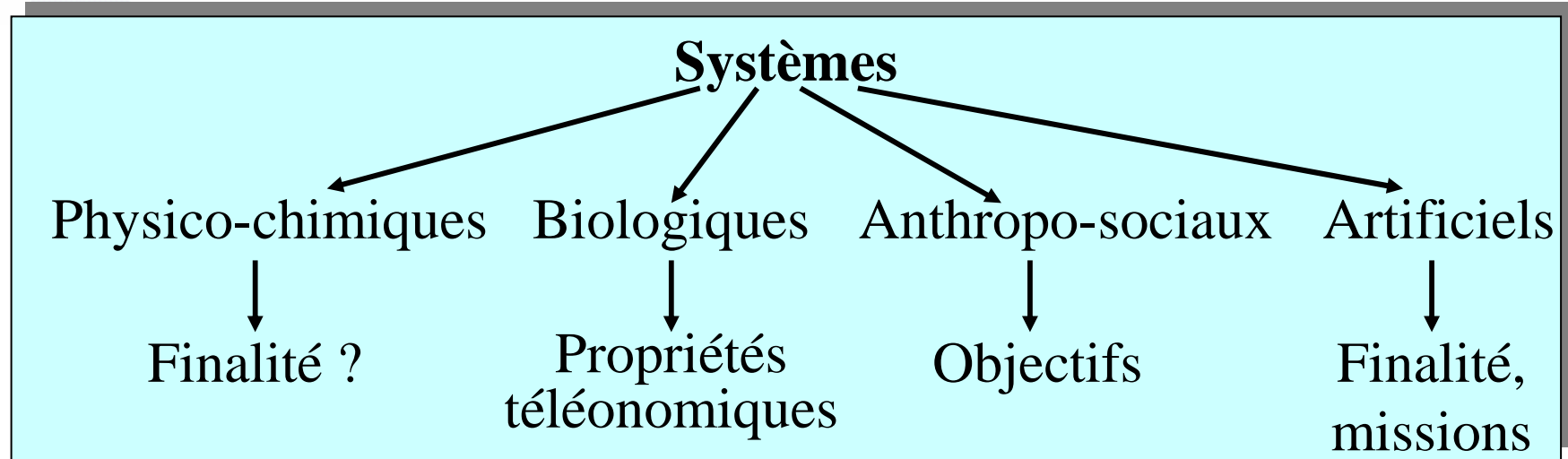
## Propriétés

<b>Totalité</b>	Structure
<b>Autonomie</b>	Relations externes
<b>Téléonomie</b>	Finalité
<b>Activité</b>	Fonctionnement
<b>Permanence</b>	Temps, évolution

## Système

- ensemble de constituants
- ensemble de relations internes (structure)
- ensemble d'objectifs
- ensemble de relations externes (environnement)

# Typologie des systèmes finalisés



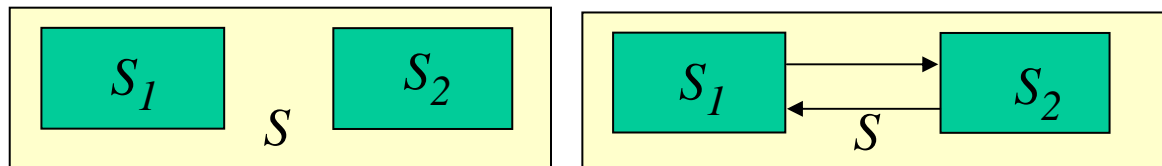
# Introduction à la théorie des systèmes

Quelques concepts

# Notion de Variété

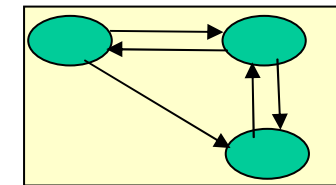
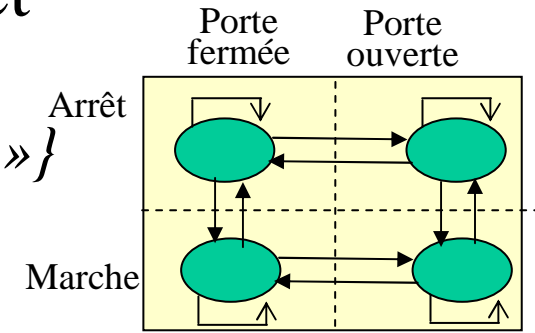
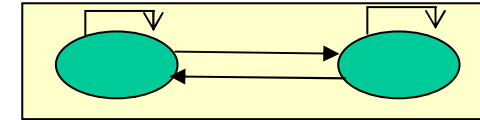
- Propriétés évolutives d'un système qui résument l'ensemble de son passé  $\Rightarrow$  **Etat interne** du système
- **Espace d'état** : ensemble E de tous les états possibles
- Taille de l'espace d'état E  $\Rightarrow$  **Variété**
- Variété = Degré de liberté du système = Incertitude pour l'observateur extérieur
- $V = \log_2(|E|)$  (*mesure en bits*)

*Mesure sous-additive :  $V(S) \leq V(S_1) + V(S_2)$  ( $= V(S_1) + V(S_2)$  si absence d'interaction entre  $S_1$  et  $S_2$ ) = nombre de dimensions binaires indépendantes de l'état*



# Variété et contrainte

- Deux états possibles  $\Leftrightarrow V = 1$
- Cas de  $n$  dimensions d'état binaires et indépendantes  $\Leftrightarrow V = \log_2(2^n) = n$ 
  - Ex :  $E_1 = \{\text{«porte ouverte»}, \text{«porte fermée»}\}$
  - $E_2 = \{\text{«marche»}, \text{«arrêt»}\}$
  - $\Leftrightarrow 4 \text{ états}, V = 2$
- Cas de dimensions non indépendantes (relation sur  $E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ )  $\Leftrightarrow V < n$ 
  - Ex : si  $e_2 = \text{«marche»}$  implique  $e_1 = \text{«porte ouverte»}$  impossible  $\Leftrightarrow 3 \text{ états}, V = \log_2 3 = 1,58$
- Modèles de dépendances  $\Leftrightarrow$  prédictions d'état
- Contrainte :  $C = V_{\max} - V$



# Entropie et information

- Il peut exister une distribution de probabilités  $P(s)$  sur les états  $e \Leftrightarrow$  besoin d'une forme plus générale

$$\underline{Ex} : p(e1) = 0,25, p(e2) = 0,25, p(e3) = 0,5$$

- **Entropie de Boltzmann** (mécanique statistique)

$$H(P) = - \sum_{e \in E} P(e) \cdot \log_2 P(e)$$

- Etats équiprobables  $\Leftrightarrow$  **H maximum** =  $\sum_{e \in E} 1/N \cdot \log_2 N$   
=  $\log_2 N \Leftrightarrow$  H se réduit à la variété  $V$  et exprime l'incertitude ou l'ignorance sur la valeur de l'état
- $H = 0$  si un état à la probabilité 1 et les autres 0  $\Leftrightarrow$  **information totale** sur l'état du système

## Entropie et information (2)

- Une **contrainte** réduit l'incertitude sur la connaissance de l'état
- **Une observation** (partielle)  $\Rightarrow$  acquisition d'information sur l'état réel  $\Rightarrow$  réduit le nombre d'états possibles ou modifie les probabilités
- **L'information** reçue (Shannon) = réduction d'incertitude  $\Rightarrow I = H(\text{avant}) - H(\text{après})$
- Si l'observation de l'état est **complète**,  $H(\text{après}) = 0$  et donc  $I = H$



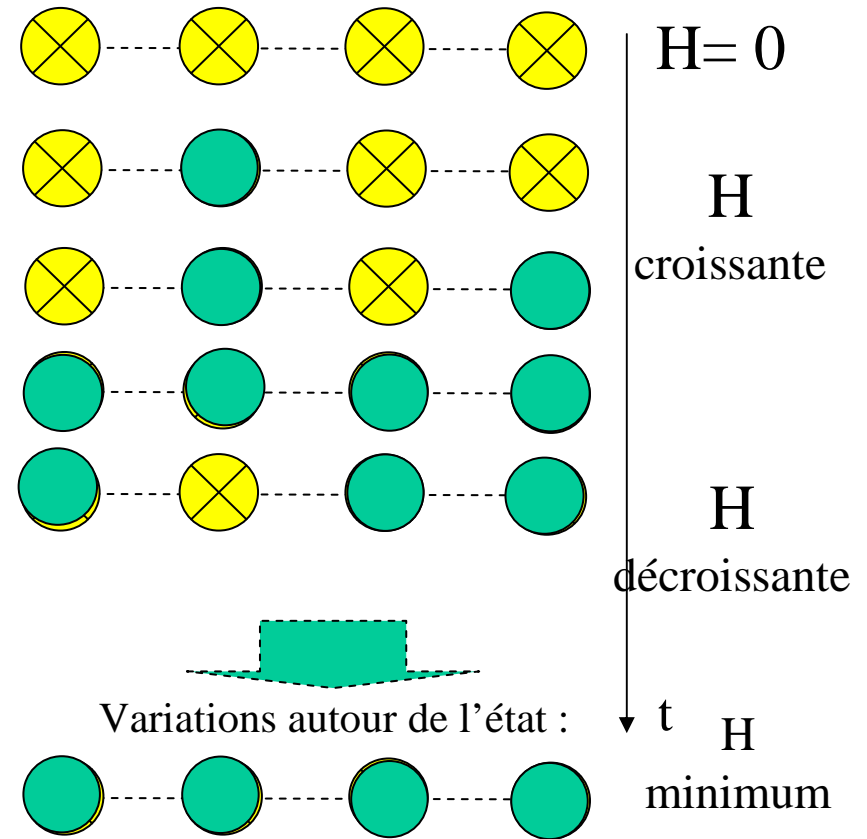
# Evolution d'un système (2)

Système de variété
   
 $\log_2 2^4 = 4$

## Exemple 2

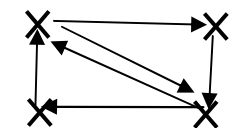
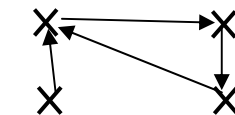
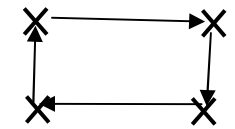
- 4 valeurs binaires indépendantes
- État de départ  $e = (1,1,1,1)$
- A chaque pas de temps, probabilités de changement d'état  $p(1 \rightarrow 0) = 0,5$  et  $p(0 \rightarrow 1) = 0,01$
- Convergence de  $[p_1, p_2, p_3, p_4]$  vers des valeurs fixes

⇒ Système à entropie
   
 croissante puis décroissante



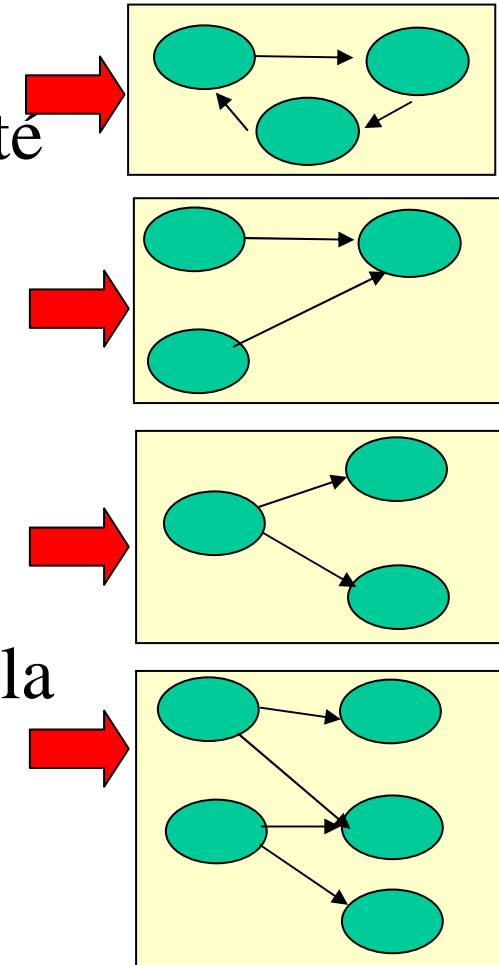
# Dynamique d'un système

- Transition d'état  $\Leftrightarrow$  Fonction de transition :  
 $T : E \rightarrow E : e(t) \rightarrow e(t+\Delta t)$
- Par définition,  $1 \rightarrow 1$  (bijection) ou  $* \rightarrow 1$
- Plus généralement (processus indéterministe),  $1 \rightarrow *$  ou  $* \rightarrow *$  avec des probabilités :  $e(t) \rightarrow \{p_{t+\Delta t}(e) ; e \in E\}$ 
  - Chaîne de Markov  $P(e_j(t+\Delta t) | e_i(t)) = M_{ij} \in [0,1]$
- Dynamiques de variété associées



# Dynamique d'un système (2)

- Transformation  $1 \rightarrow 1$  : conserve les distinctions entre états et donc la variété et l'incertitude
  - Transformation  $* \rightarrow 1$  : efface les distinctions et réduit la variété
  - Transformation indéterministe  $1 \rightarrow *$  : accroît la variété et l'incertitude
  - Transformation indéterministe  $* \rightarrow *$  : la variété croît ou décroît selon les cas
- De même pour les interactions **entre** systèmes (*A affecte B si l'état de B à  $t + \Delta t$  dépend de l'état de A à  $t$* )

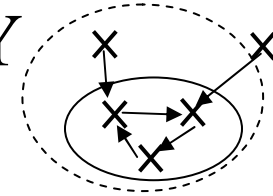


# Processus circulaires

- **Circularité** : processus où les effets peuvent rétroagir sur les « causes »
- Auto application :  $y = f(y)$ 
  - Forme continue :  $f =$  équation différentielle
  - Forme à temps discret :  $y_{t+1} = f(y_t)$
  - Causalité « circulaire »
  - Base des systèmes asservis, du chaos et de la géométrie fractale

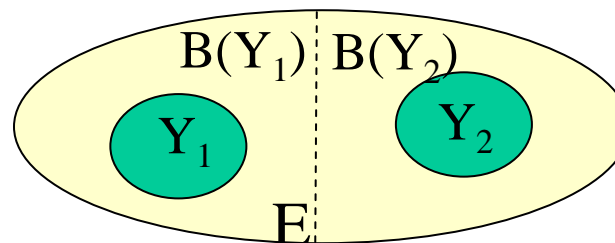
# Auto organisation

- État d'équilibre, ou état absorbant :  $y_{t+1} = f(y_t)$
- Sous-ensemble absorbant :  $Y \subseteq E ; f(Y) \subseteq Y$
- Si  $Y$  est minimum,  $Y$  est dit *attracteur*
- Un **bassin d'attraction** de  $Y$  est le sous-ensemble d'états  $B(Y)$  :



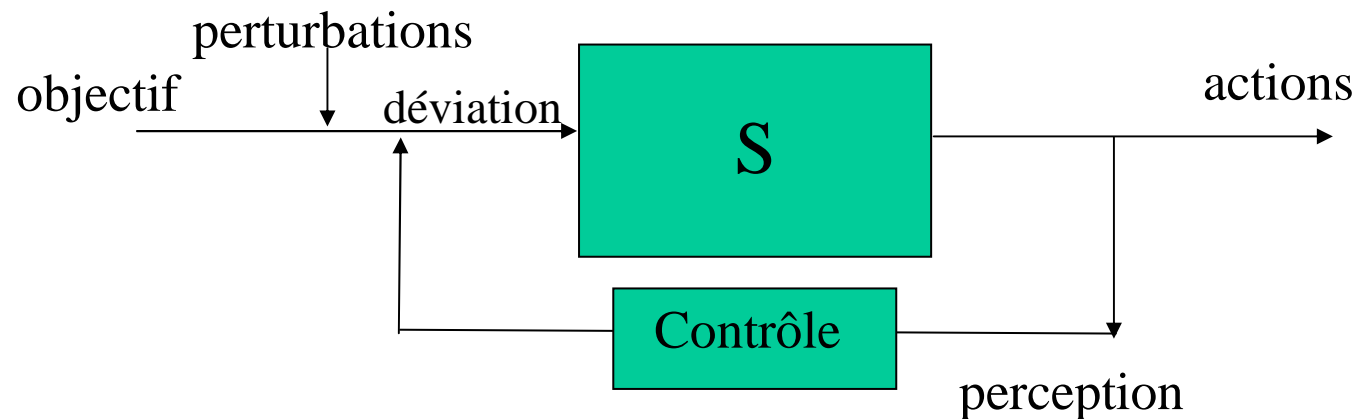
$\forall e \in B(Y), e \notin Y, \text{ il existe } n \text{ tel que } f^n(e) \in Y$

- Décroissance d'entropie  $\Leftrightarrow$  « auto organisation »
- Dans un système déterministe, un état appartient soit à un attracteur soit à un bassin



# Rétro action

Prise en compte d'une déviation par rapport à l'effet souhaité (objectif, consigne) dans l'entrée



- **Rétroaction négative** : régulation, recherche de propriétés de stabilité (destruction de variété)
- **Rétroaction positive** : divergence (effet « boule de neige »), mais aussi formes d'auto organisation

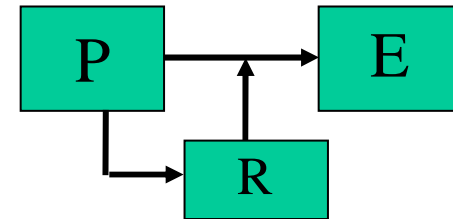
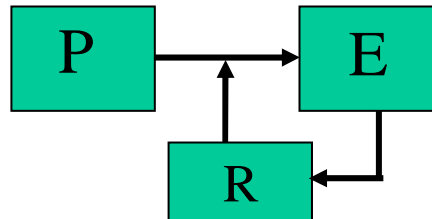
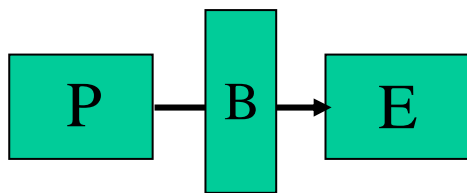
# Contrôle et finalité

- Tendence vers un objectif malgré la survenue de perturbations (« goal directedness »)  $\Rightarrow$  contrôle d'un système  
Ex : minimiser les effets des perturbations pour conserver une valeur dans une plage acceptable
- Comparable à un équilibre stable
- Objectif plus ou moins complexe ou dynamique
- Sous-ensemble acceptable de **variables** « **essentiels** », ou fonction de préférence

# Mécanismes de contrôle

Trois méthodes de base de régulation :

- **Buffering** : absorption passive des perturbations en amont  
Ex : amortisseurs, réservoir, régulateur de flux
- **Feedback** : action de compensation des perturbations après la survenue d'un effet
- **Feedforward** : action de suppression des perturbations avant leur effet (anticipation)



# Loi de la Variété Requise

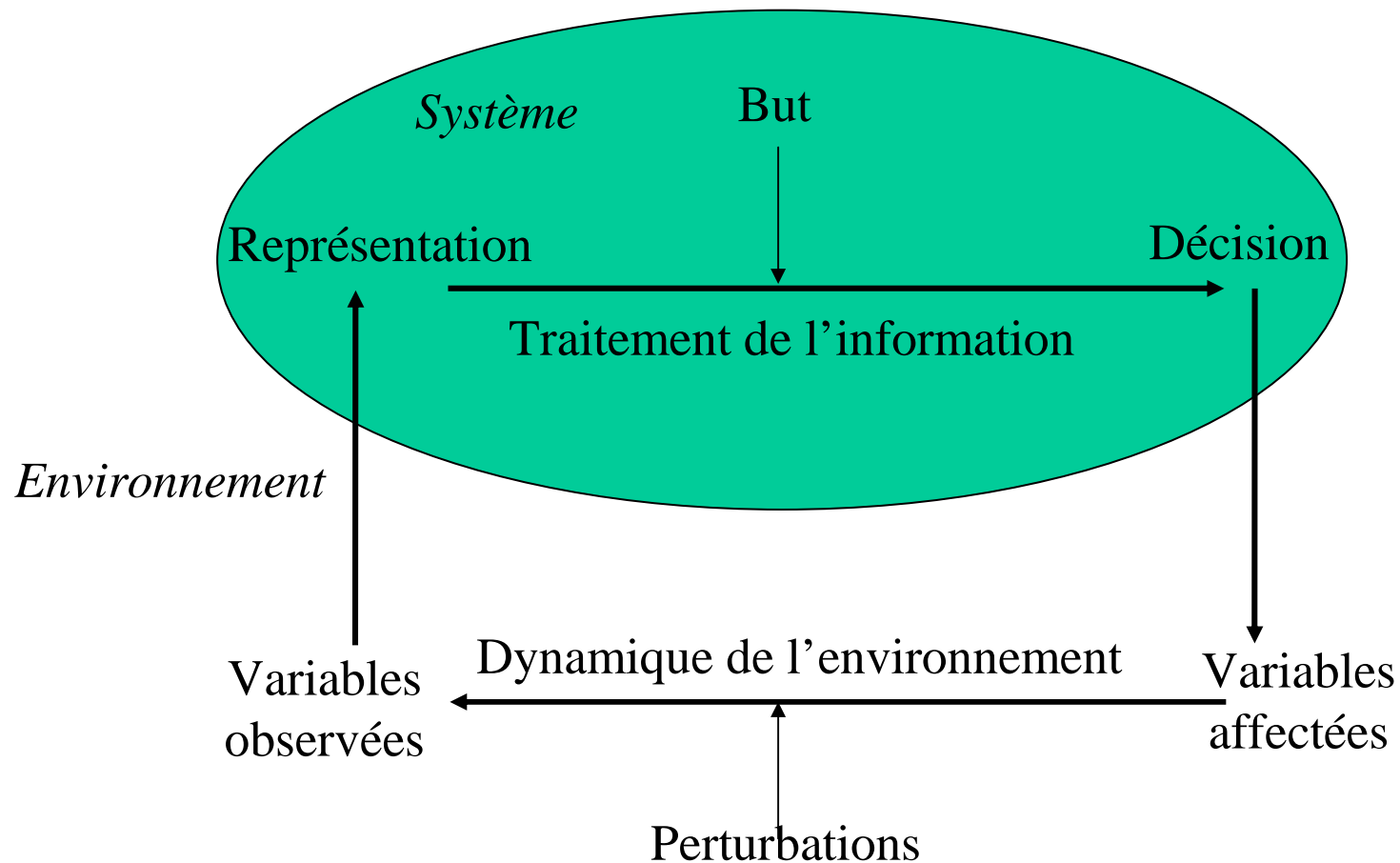
- Formulation du contrôle comme une réduction de variété  $\Rightarrow$  éviter la transmission de la variété de l'environnement sur celle du système = opposé de la communication
- Le régulateur doit être capable de produire au moins autant de contre réactions que de perturbations

$$V(R) \geq V(P) + V(E) - K$$

$V(R)$  : Variété du régulateur  
 $V(P)$  : Variété des perturbations  
 $V(E)$  : Variété des variables essentielles  
 $K$  : réduction de Variété due au buffering

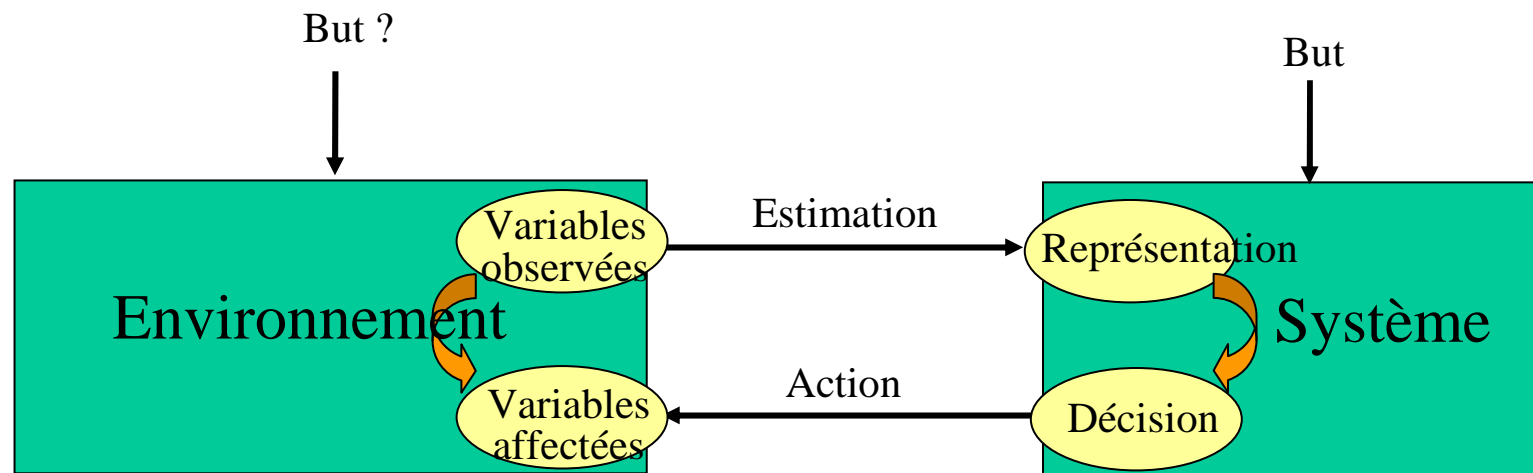
« *Seule la variété peut compenser la variété* »

# Structure d'un système de contrôle

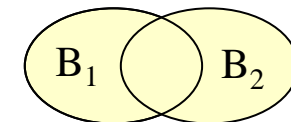


# Boucle de contrôle

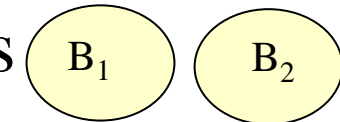
## Vision « symétrique »



• Buts compatibles  $\Rightarrow$  Systèmes coopératifs

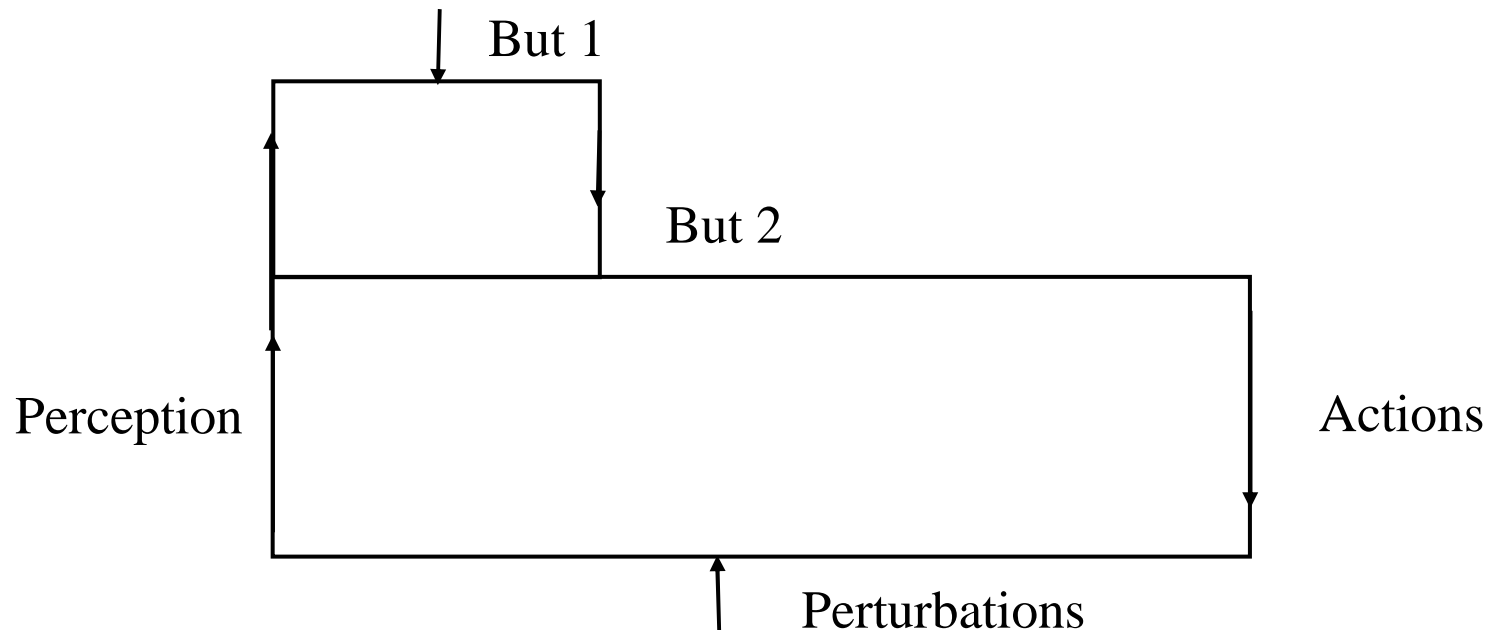


• Buts incompatibles  $\Rightarrow$  Systèmes compétitifs



# Hiérarchie de contrôle

- Dans les systèmes tels que les organisations, les buts sont en général organisés en hiérarchie (Ex : finalité, objectifs, but, ...)
- Le but fixé au niveau  $n$  est le résultat d'une action menée au niveau  $n+1$



# Éléments de théorie des systèmes

Systemes et environnement

Systemes et sous-systemes

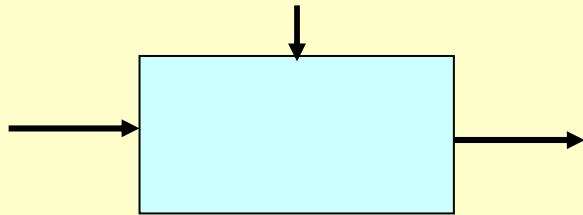
Systemes et temps

Complexité

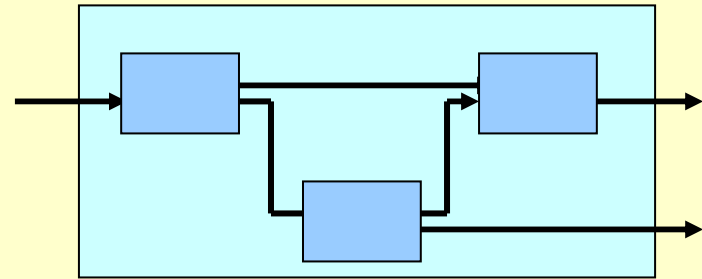
Pilotage des systemes

# Axes d'approche des systèmes

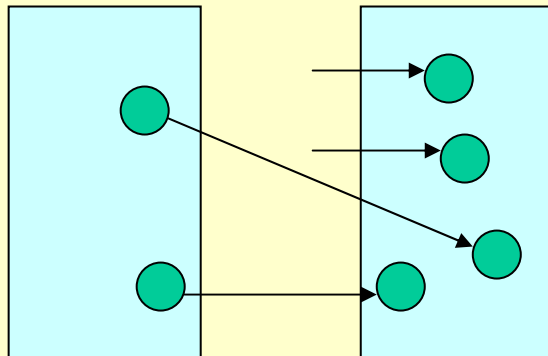
## 1. Système et environnement



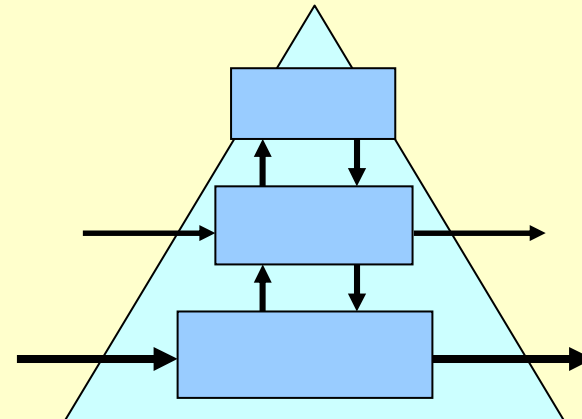
## 2. Système et sous-systèmes



## 3. Systèmes et temps



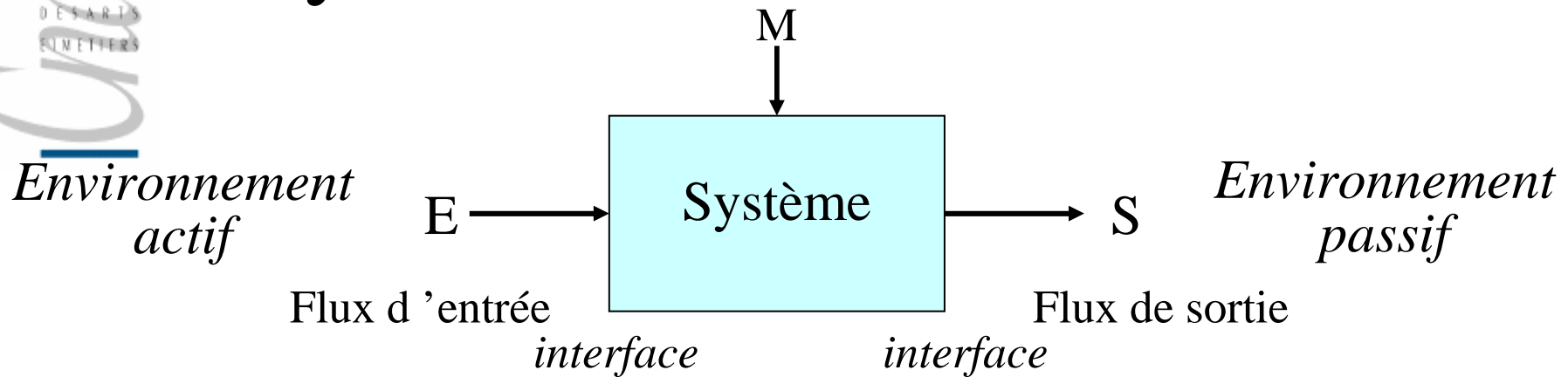
## 4. Pilotage des systèmes





# Systemes et environnement

# Systeme et environnement



Appréhende le système dans sa globalité à travers ses effets sur l'environnement = Approche spécification des exigences

- Vision « boîte noire » en ne considérant que les relations avec l'environnement
- le système est vu comme un processus transformateur de flux

Mission M (objectifs, contraintes) du système  
Frontière F le séparant de son environnement  
Fonction  $S = f(E)$

# Flux d'entrées et de sorties

## Trois types de flux

### Matière, Energie et Information

- les flux de matière et d'énergie obéissent à des lois strictes de conservation
- les flux d'informations peuvent être à la fois utilisés ou diffusés et conservés

Sorties Entrées	Flux physique	Information
Flux physique	système de transformation physique	capteur
Information	actionneur	système de traitement de l'information

*Transformation des flux*

# Les transformations de flux

Trois types de transformations élémentaires dans le temps, dans l'espace, dans la forme

*Matrice*  
*MEI-TEF*

	M Matière	E Énergie	I Information
T Temps	stockage	accumulation	mémorisation
E Espace	transport	transport	communication
F Forme	transformation	transformation	traitement

## Flux physiques

- mesurables
- conservation
- équations aux dimensions
- consommés par les transformations

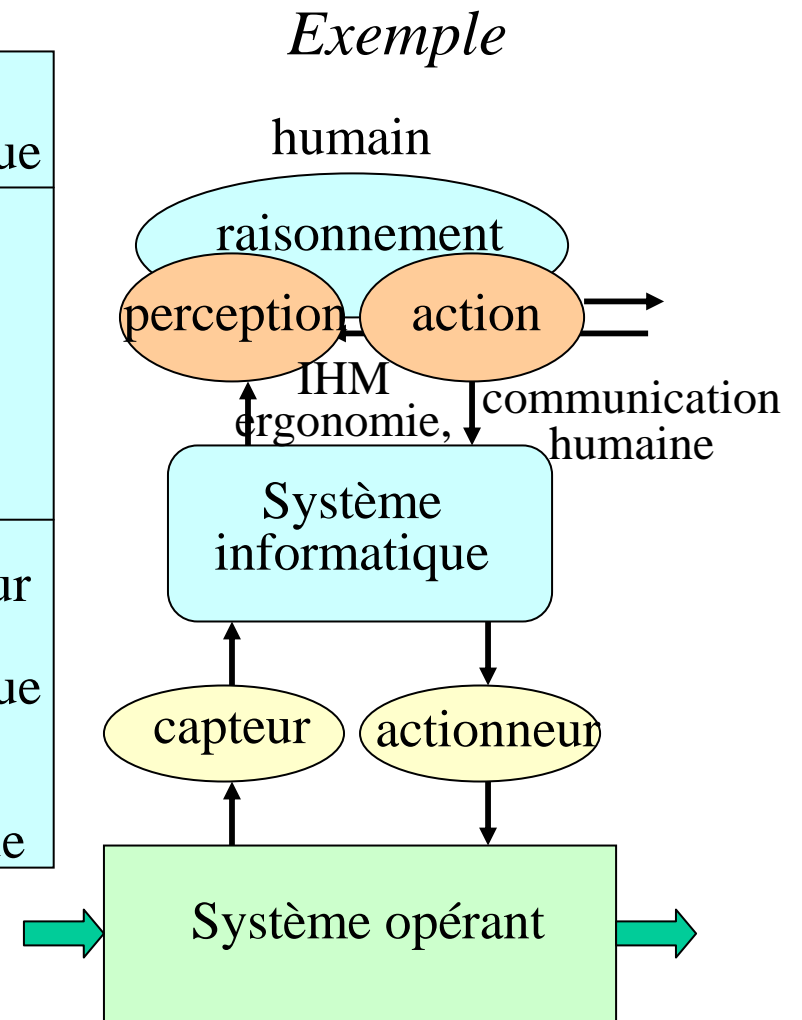
## Flux informationnels

- transportent un sens
- non mesurables
- aspects sémantique, pragmatique
- non consommés

# Problématiques comparées

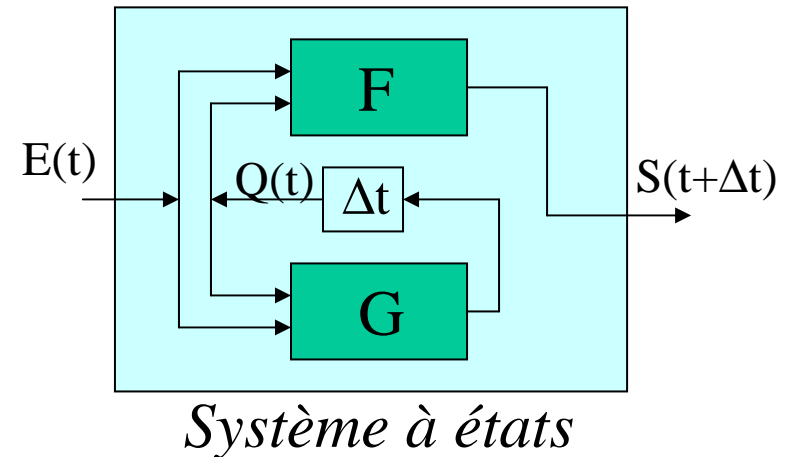
	Système technologique	Système humain	Système informatique
frontière	objets physique	limites floues	limites nettes
flux	grandeurs mesurables matière énergie	information pertinence entropie?	données sur support informatique  perte sémantique

*Approche boîte noire et flux d'entrées-sorties*

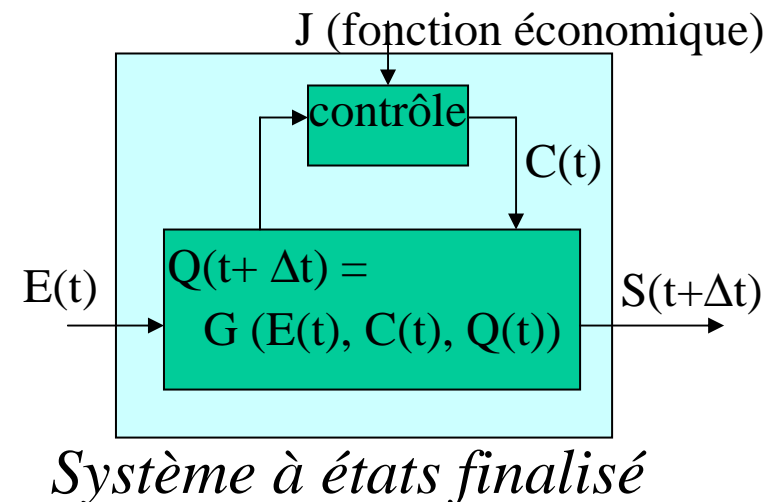


# Relations entrées-sorties

- **Causalité** (déterminisme)
  - une sortie dépend de l'histoire des entrées, résumée par un *état*
  - automates état-transition (*E/S discrètes, t discret*)
  - modèles d'états (*E/S continues, t continu, E/S continues, t discret*)



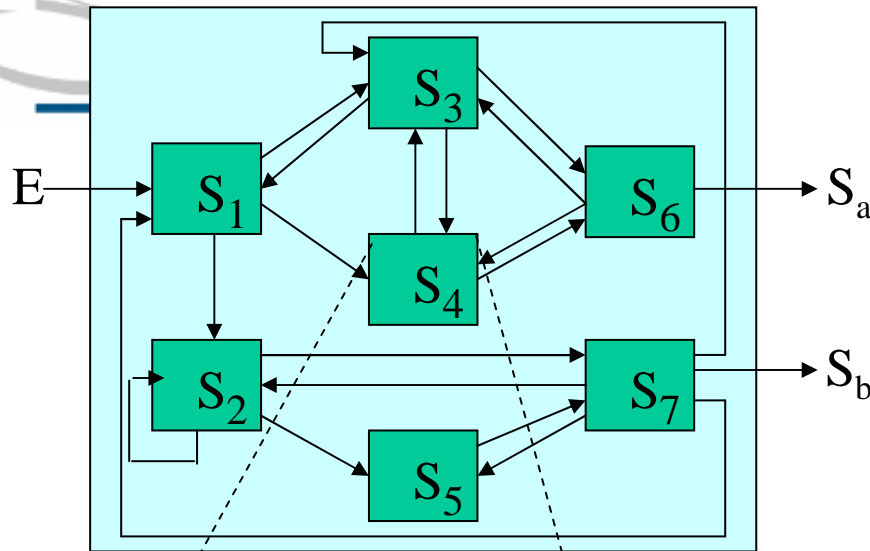
- **Finalité**
  - expression de la relation E/S sous le forme d'une fonction à rendre acceptable ou optimale
  - existence d'un contrôle interne au système



# Systemes et sous-systemes

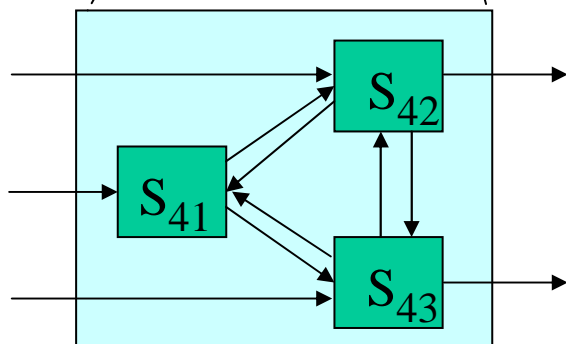
Décomposition des systèmes et  
propriétés émergentes

# Décomposition d'un système



	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_a$	$S_b$
$S_1$	0	1	1	1	0	0	0	0	0
$S_2$	0	1	0	0	1	0	1	0	0
$S_3$	1	0	0	1	0	1	0	0	0
$S_4$	0	0	1	0	0	1	0	0	0
$S_5$	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$S_6$	0	0	1	1	0	0	0	1	0
$S_7$	1	1	1	0	1	0	0	0	1
$E$	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Matrice de couplage  $N^2$



Hiérarchie de systèmes.  
Limitations psychologiques  
7 sujets en largeur, 4 niveaux en  
profondeur

- Vue fonctionnelle ou organique
- regroupement des sous-systèmes à forte cohésion interne
- propriétés **émergentes** : stabilisation, propagations, résonances, etc. et
- propriétés **immergentes**

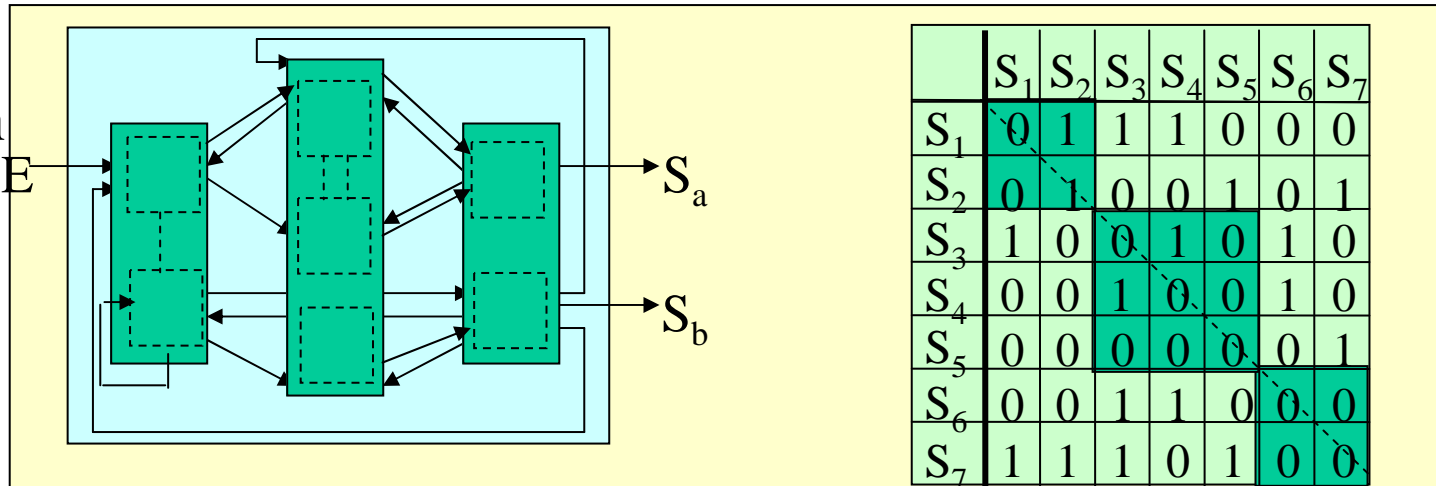
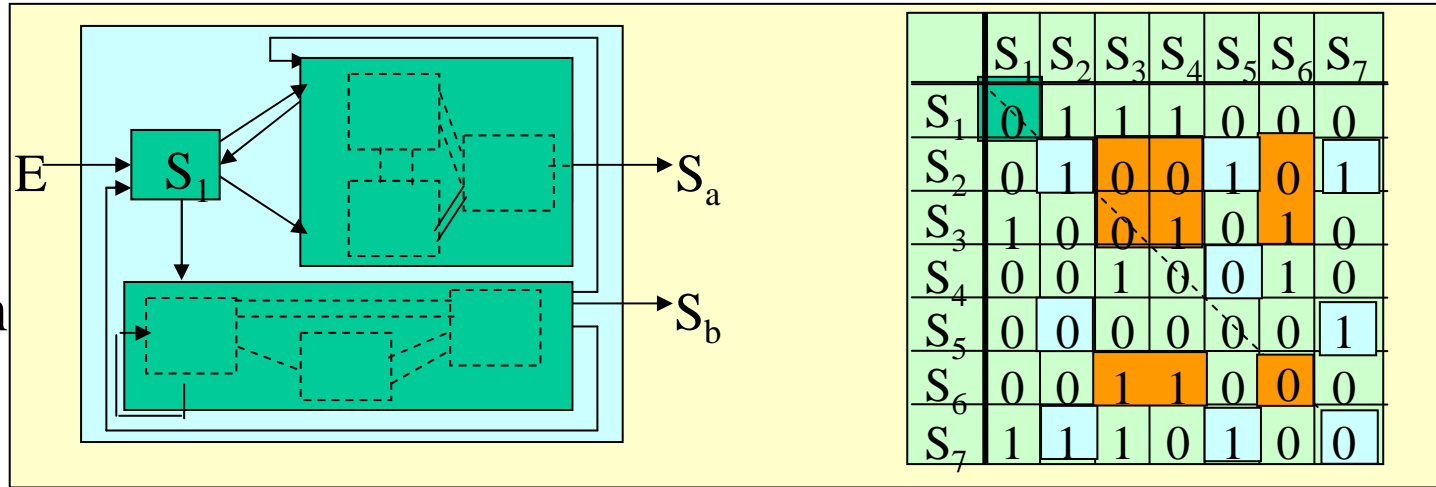
# Décomposition et regroupement

## *Exemples de décompositions*

Qualité de  
décomposition

>

Qualité de  
décomposition



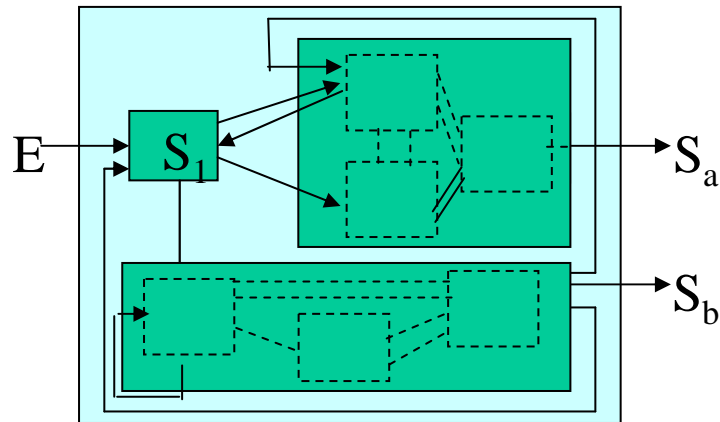
# Métriques de couplage

Recherche de décomposition avec sous-systèmes à forte cohésion interne et faibles couplages externes

- Rapport de couplage  
 $R = \text{nombre de couplages} / \text{nombre de couplages possibles}$
- Qualité de couplage du sous-système  $i$   
 $M_i = R_i \text{ interne} - R_i \text{ externe}$
- Qualité de couplage du système  
 $M = \text{moyenne des qualités de couplage des sous-systèmes}$

*On peut aussi pondérer les interactions, suivant la facilité de mise en œuvre, le coût, la testabilité, ....*

# Métriques de couplage. Exemples



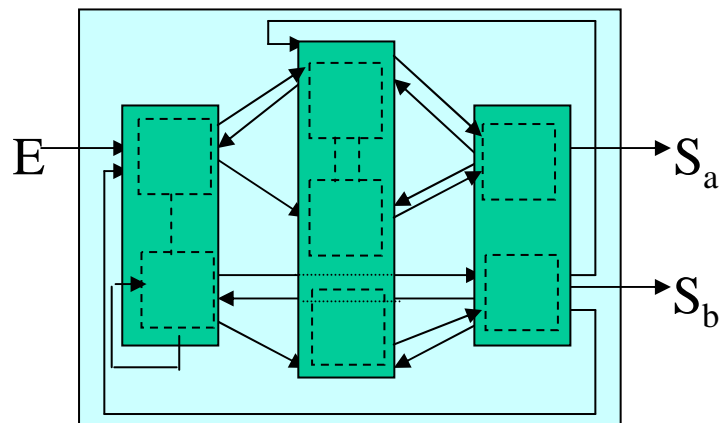
*décomposition 1*

$$M_1 = 1 - 5/12 = 0,58$$

$$M_2 = 6/6 - 4/24 = 0,83$$

$$M_3 = 5/6 - 3/24 = 0,71$$

$$M = 1/3 (0,58 + 0,83 + 0,71) = 0,71$$



*décomposition 2*

$$M_1 = 1/2 - 7/20 = 0,15$$

$$M_2 = 2/6 - 11/24 = -0,12$$

$$M_3 = 0/2 - 10/20 = -0,5$$

$$M = 1/3 (0,15 - 0,12 - 0,5) = -0,17$$

Élément clé de l'intégration  $\Leftrightarrow$  ensemble des interfaces à
   
 vérifier lors de l'intégration d'un sous-système

# Propriétés émergentes

Deux types de propriétés d'un système :

- propriétés *spécifiques* de chaque composant
- propriétés *globales* du système : résultent des propriétés des sous-système et du réseau d'interactions

Propriétés émergentes : propriétés globales qui apparaissent du fait des interactions

	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>
S <sub>1</sub>	0	1	1	1	0	0	0	0	0
S <sub>2</sub>	0	1	0	0	1	0	1	0	0
S <sub>3</sub>	1	0	0	1	0	1	0	0	0
S <sub>4</sub>	0	0	1	0	0	1	0	0	0
S <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0
S <sub>6</sub>	0	0	1	1	0	0	0	1	0
S <sub>7</sub>	1	1	1	0	1	0	0	0	1
E	1	0	0	0	0	0	0	0	0

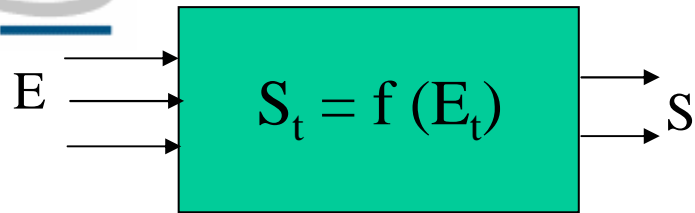
– Effets de propagation

- propagation d'erreurs conduisant à une défaillance
- propagation de pannes ou de surcharge (*Ex: effondrement de réseaux de communication*)

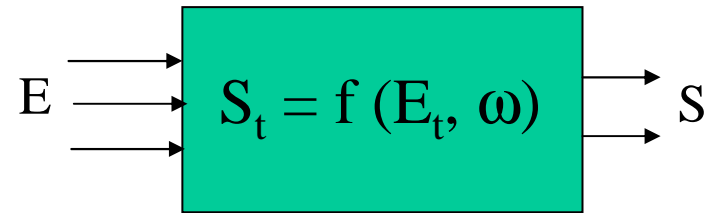
– Effets de rétro-action

- effet de stabilisation
- effet d'amplification et de résonances (*effet « boule de neige » : Ex : crack boursier de 1987*)

# Émergence de la séquentialité



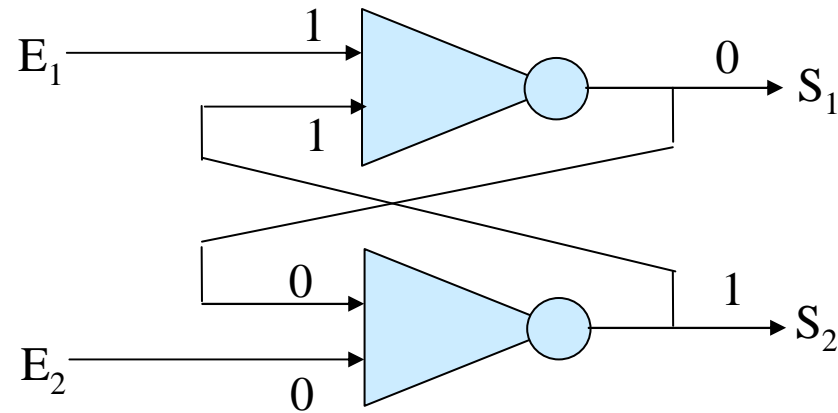
*Système statique*  
 propagation pure



*Système séquentiel*  
 existence de rétroactions internes

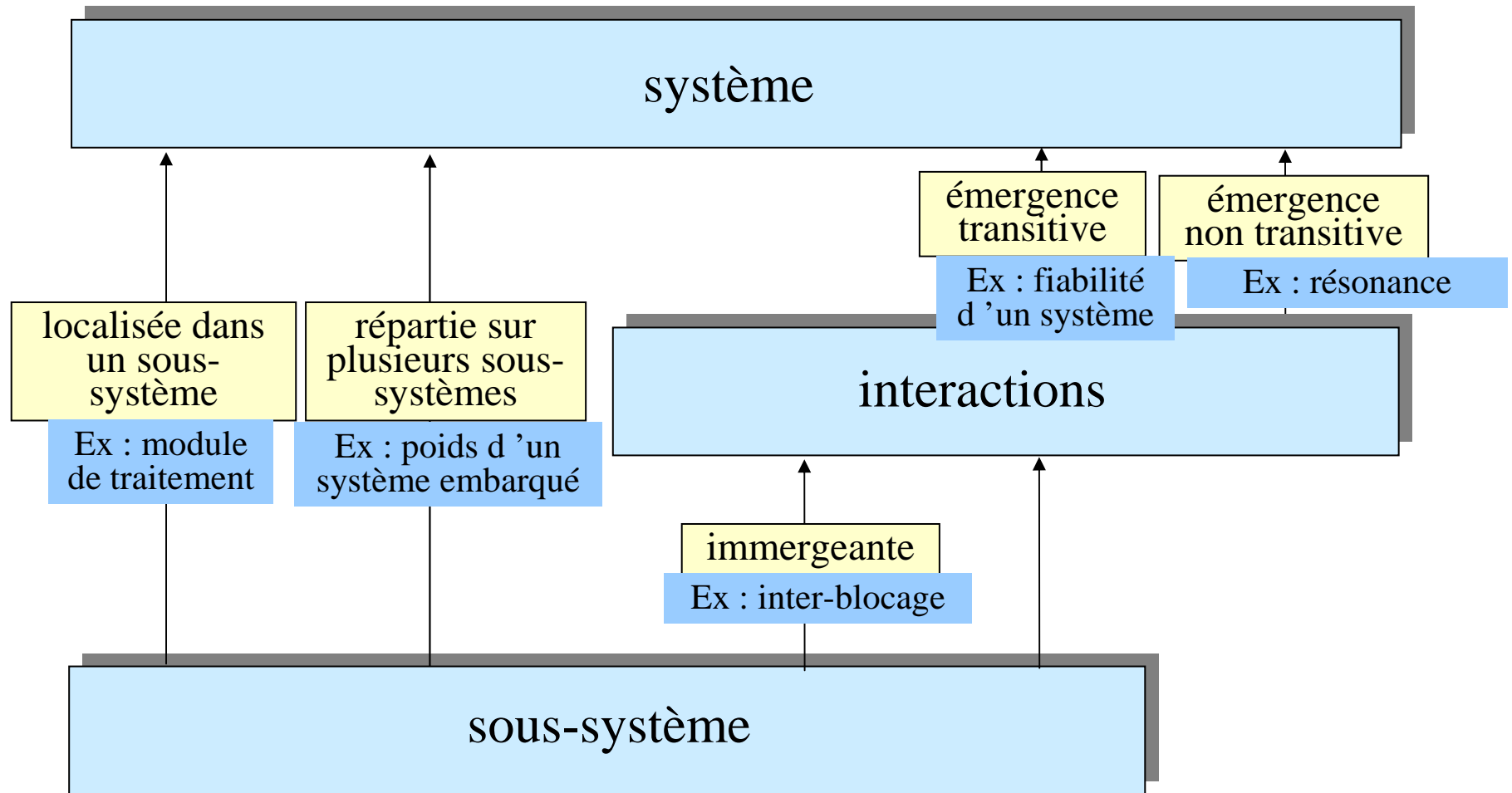
Exemple : émergence de la propriété de mémoire

$E_1$	$E_2$	$S_1$	$S_2$
1	0	0	1
1	0	0	1
0	0	0	1
0	0	0	1
1	0	0	1
0	0	0	1
0	1	0	0
0	1	1	0
0	1	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0
...	...	...	...



# Classification des propriétés d'un système

*Classification de Thomé*



# Décomposition et architecture

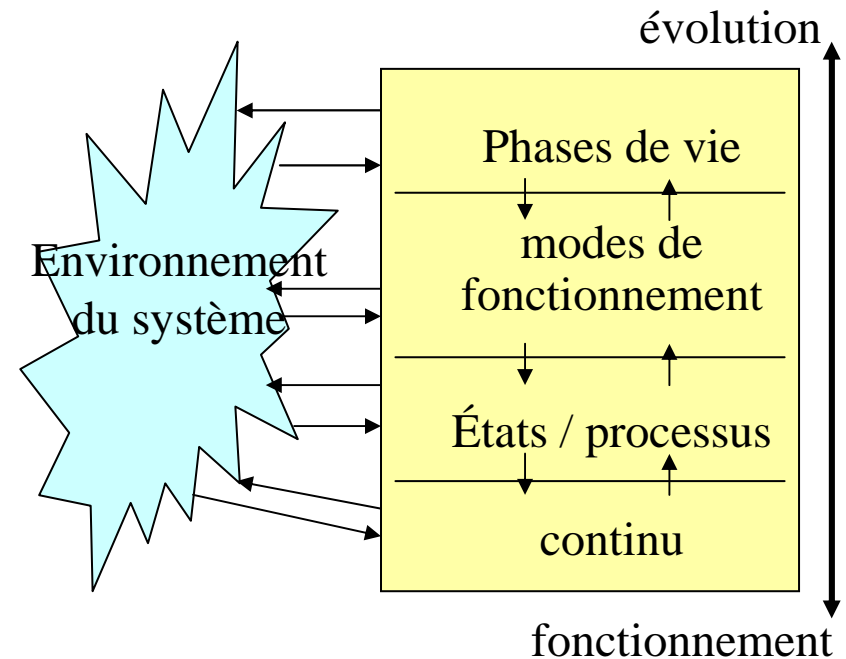
- Décomposition non intrinsèque du système  $\Rightarrow$  alternatives et choix de décomposition
- but recherché : systèmes plus faciles
  - à intégrer
  - à maintenir
  - à faire évoluer
  - à réutiliser partiellement
- décomposition hiérarchique à forte cohésion et faibles couplages, définition d 'interfaces de services  
 $\Rightarrow$  modularité en logiciel, approche objet
- critères d 'homogénéité : sous-traitance à un seul génie
- critères psychologiques : 7 éléments, 4 niveaux

# Systemes et temps

Dynamique et évolution des systèmes

# Systemes et temps

- Invariance temporelle, intégrité de comportement
- propriétés non invariantes ⇒ changements :
  - continu
  - discontinu
- Trois approches d'analyse :
  - **temps continu** : ex : modèles de régulation
  - **temps discret** ( $t, t+\Delta t, \dots$ ) : échantillonnage
  - **temps « logique » discret** : événements (systèmes séquentiels, état-transition, ...)

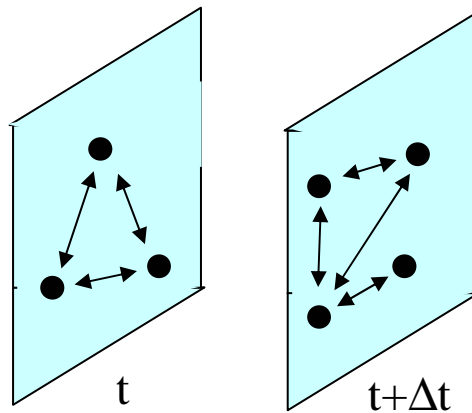


- Séparer dynamique et évolution (conjoncturel / structurel)
- modéliser la dynamique
- conférer l'aptitude à l'évolution de la mission, de l'environnement, de la technologie

# Vision synchronique et vision diachronique

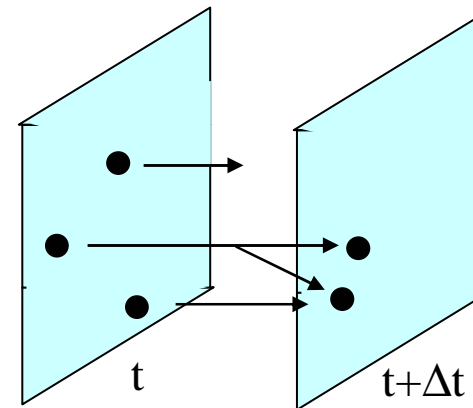
## Dimension temporelle

- vision **synchronique** : propriétés du système à des instants donnés
- vision **diachronique** : évolution dans le temps de certaines propriétés du système



Analyse et étude des propriétés structurelles

*Vision synchronique*



Analyse des facultés d'adaptation

*Vision diachronique*

# Principe de synchronisation

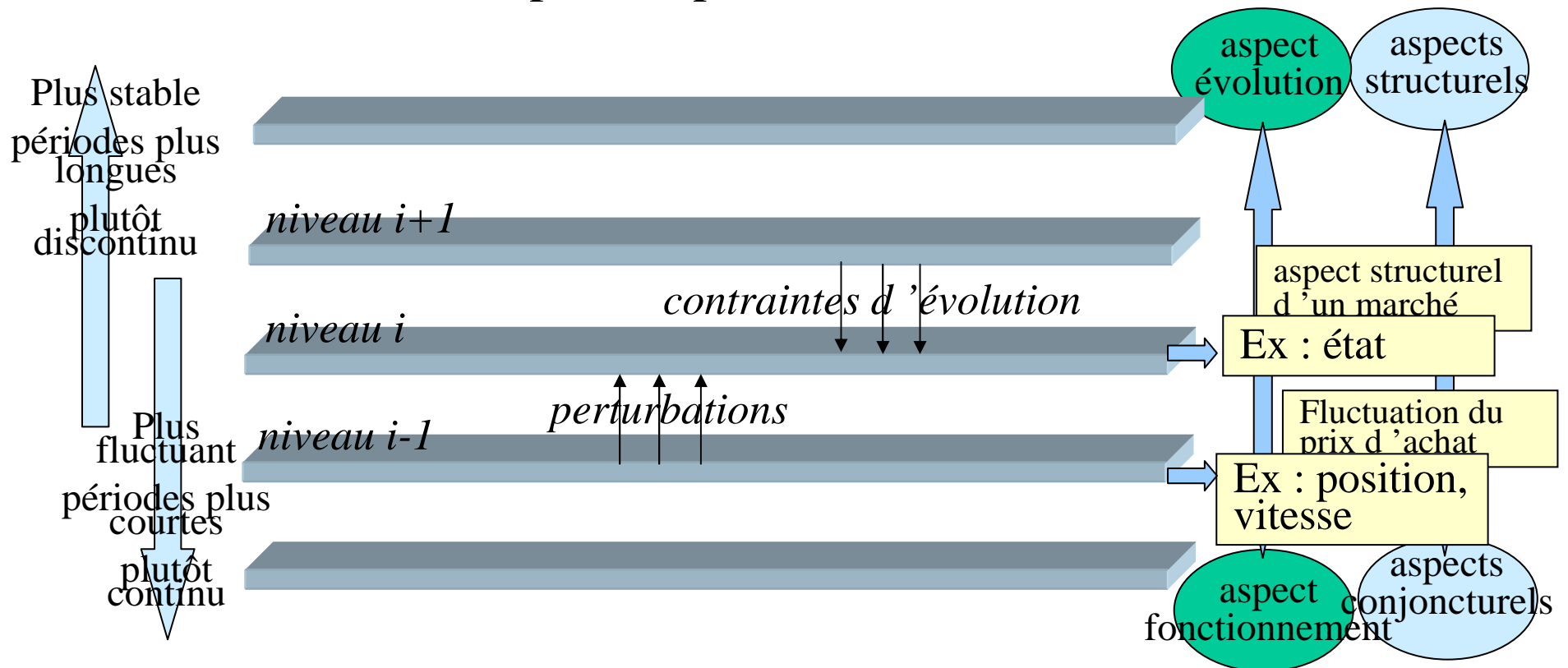
Deux types de propriétés d'un système :

- propriétés **synchroniques** : relations entre caractéristiques d'un système à un instant donné (propriété structurelle, propriété d'organisation,...)
- propriétés **diachroniques** : évolution dans le temps de relations entre les mêmes caractéristiques (propriété d'adaptation)

**Principe de synchronisation** : postule que des caractéristiques soumises à des propriétés diachroniques sont tout instant compatibles avec les propriétés synchroniques susceptibles de les lier

# Hiérarchie des niveaux d'invariance temporelle

Classement des caractéristiques d'un système par vitesse d'évolution de plus ou plus rapide, ou niveau d'invariance de plus en plus faible

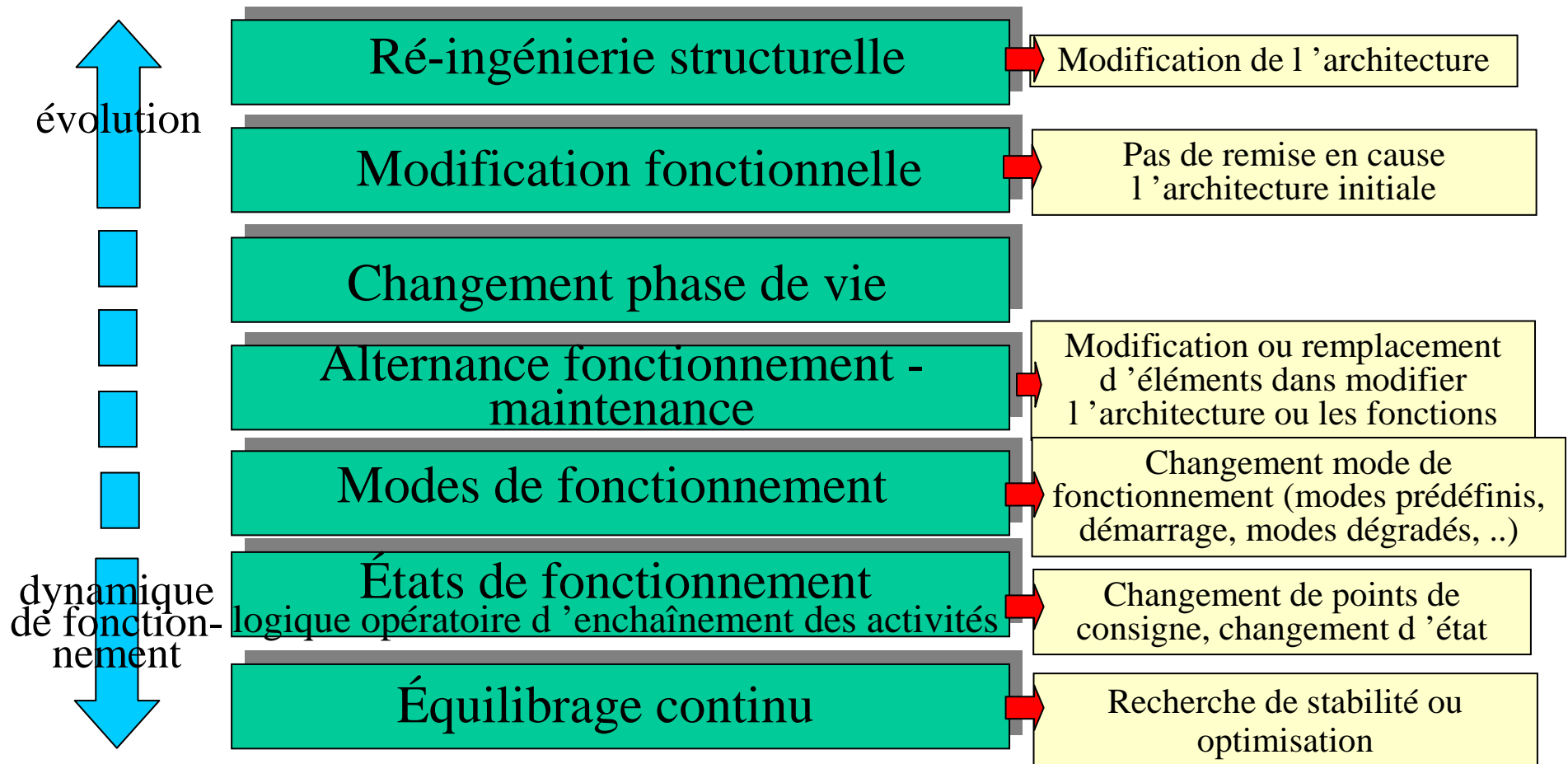


# Dynamique et évolution

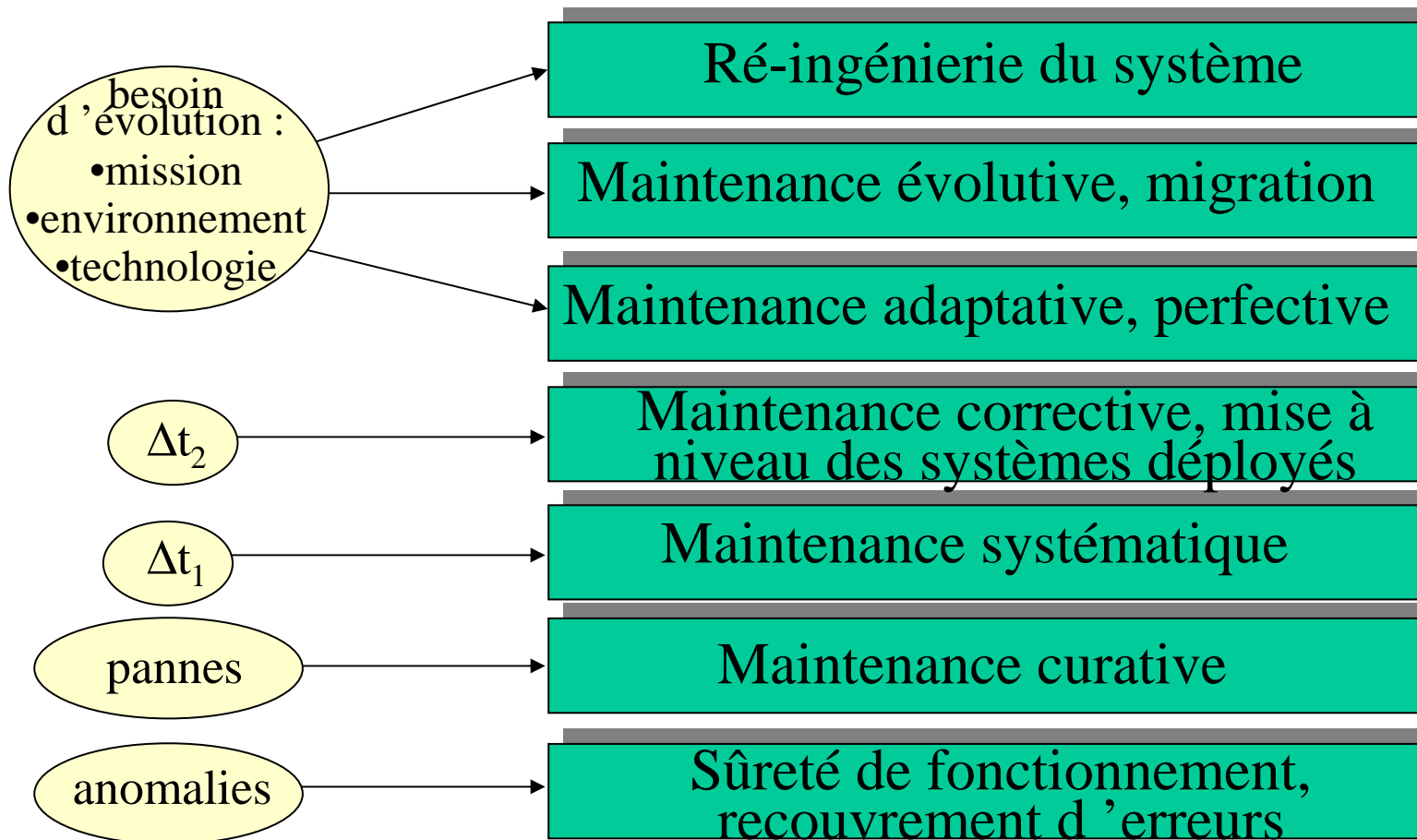
Deux niveaux temporels :

- dynamique : modifications conjoncturelles
    - transformations dans les sous-systèmes
    - interactions internes et externes
  - évolution : modifications structurelles
    - frontières
    - organisation en sous-systèmes
    - interactions internes, externes
    - lois de transformation des sous-systèmes
- ⇒ concepts de **structure**, **fonction** et **évolution**

# Hiérarchie temporelle dans un système technologique

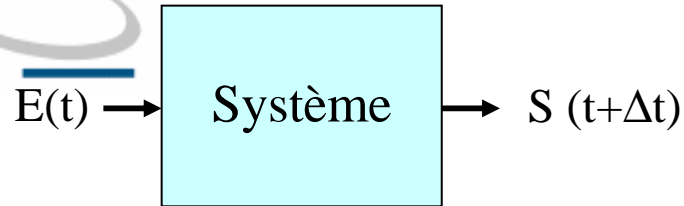


# Hiérarchie temporelle de MCO



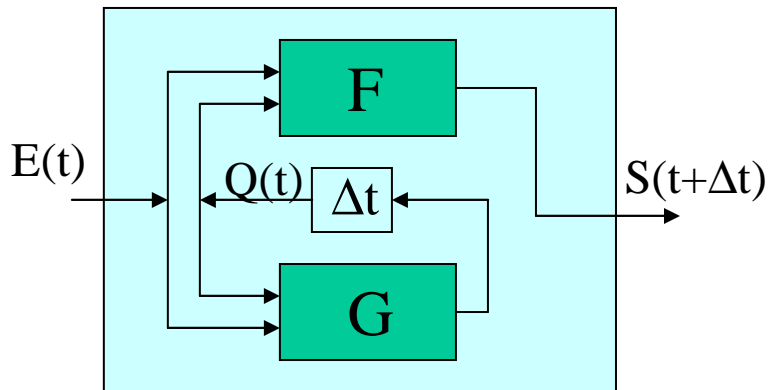
# Aspects dynamiques

# Systemes à états



**Automates finis** : 2 hypothèses :

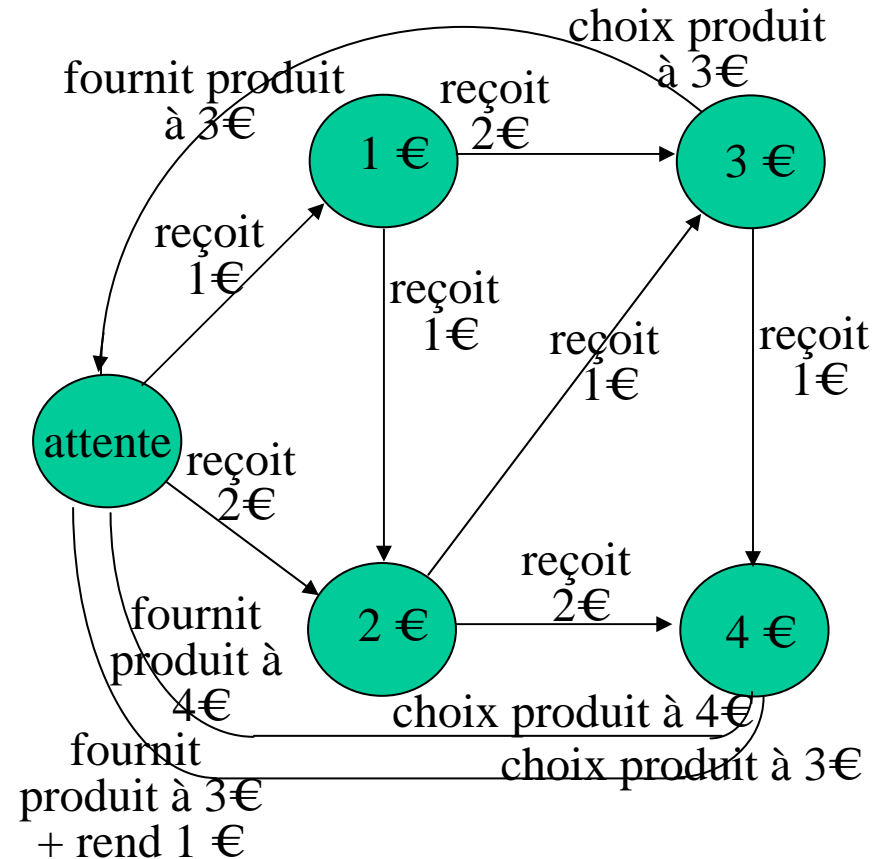
- **causalité** :  $S(t+\Delta t)$  ne dépend que de  $E(t)$  et de l'histoire antérieure à  $t$
- **finitude** : l'histoire antérieure est résumée par un état qui ne prend qu'un ensemble fini de valeurs



$$S(t+\Delta t) = F[E(t), Q(t)]$$

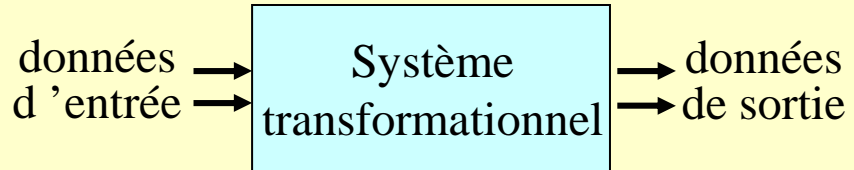
$$Q(t+\Delta t) = G[E(t), Q(t)]$$

*Ex : distributeur automatique*



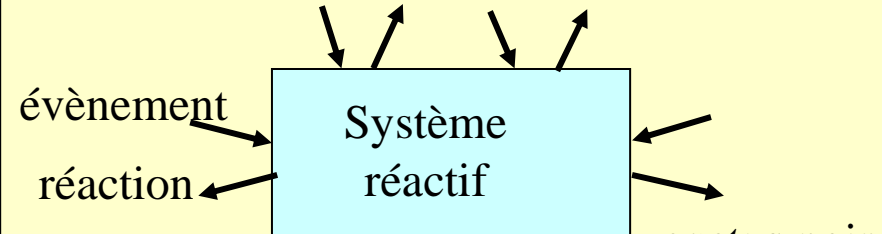
Automate à états finis

# Cas du temps réel



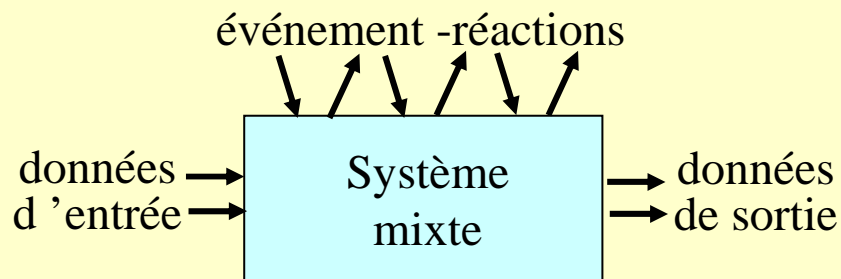
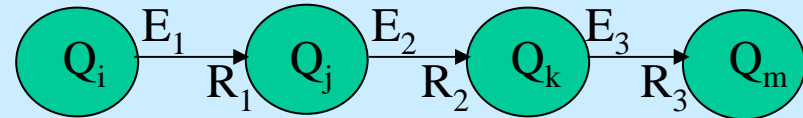
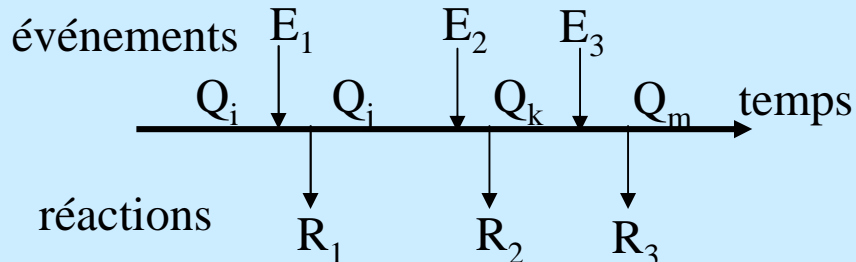
## Systèmes transformationnels *boite noire*

- description aisée en termes de fonctions
- approche rigoureuse possible



## Systèmes purement réactifs *cactus noir*

- description en termes d'événements et d'actions en retour
- description rigoureuse en terme d'états-transitions



## Systèmes temps réel

- système à la fois transformationnel et réactif
- comportement complexe : ensemble de séquences d'activité transformatrices de flux, d'événements, d'actions, de conditions associées à des contraintes temporelles
- ne se représente pas facilement dans une approche structurée
- pas de preuve formelle : domaine de la simulation



# Évolution des systèmes

# Évolution en ingénierie des systèmes

Changements au cours de la vie opérationnelle : missions, environnement, usure, évolution technologique  $\Rightarrow$  prévoir la survie du système

## Lois de Lehman

(lois empiriques de croissance)

- **loi du changement continu** : les systèmes doivent être adaptés, sinon, ils deviennent de moins en moins utiles à leur environnement
- **loi de la complexité croissante** : les systèmes se complexifient inexorablement en créant des objets incompatibles avec l'architecture initiale. La restructuration demande de plus en plus de ressources (croissance de l'« entropie » du système)
- **loi de stabilité organisationnelle** : la dynamique de croissance des systèmes est autorégulée par le management ou l'environnement du projet

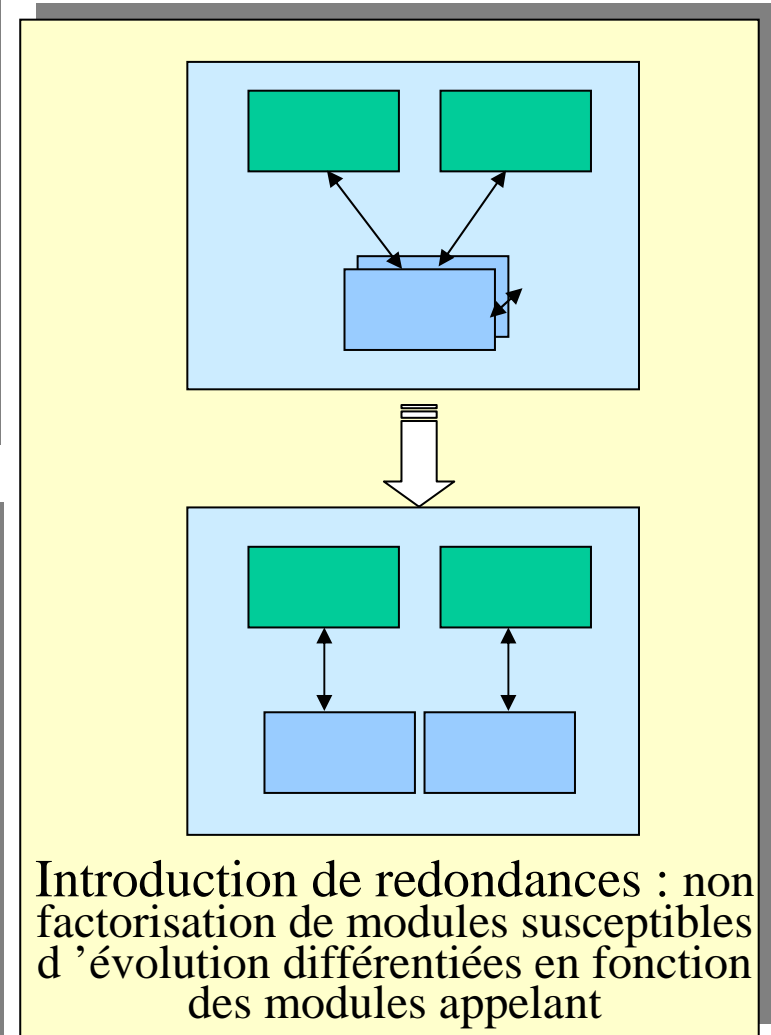
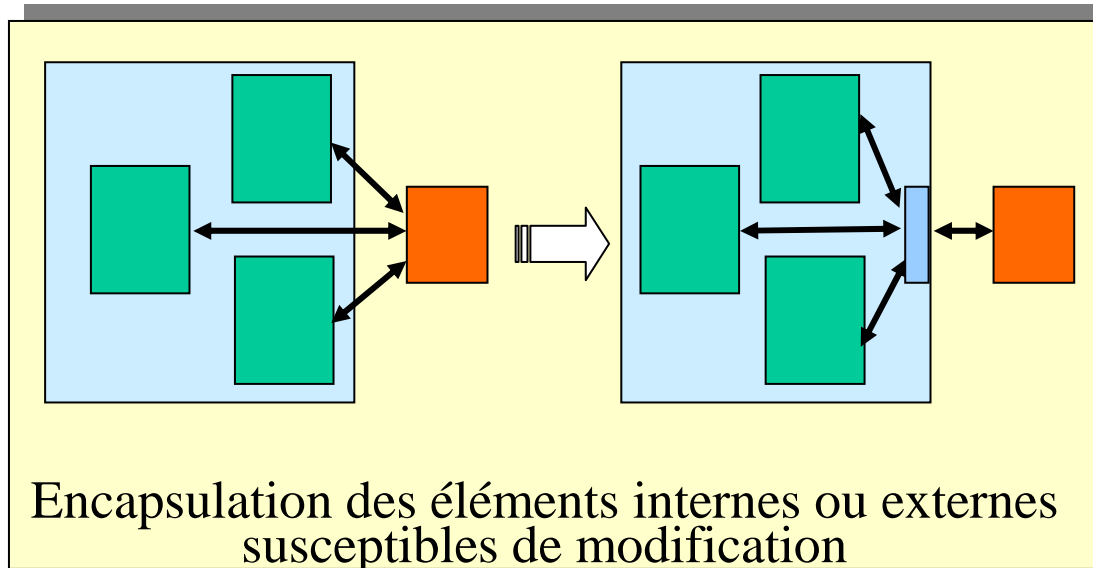
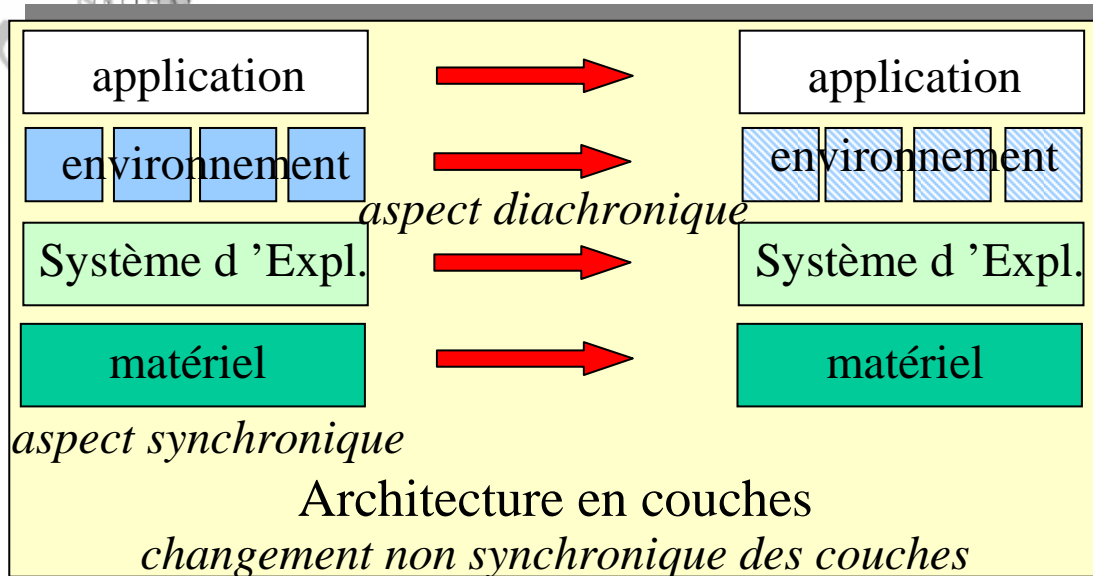
Le processus de modification ne s'arrête que lorsque le coût des modifications devient supérieur au coût de remplacement, ou perd son utilité

# Maîtrise de l'évolution

Recherche d'**invariants** ou d'éléments de stabilité par rapport aux évolutions potentielles

- au niveau de la **spécification** :
  - instabilité des fonctions dues aux multiples contraintes (mission, changement d'environnement organisationnel ou réglementaire, ...)
  - types d'entités relativement stables
  - modélisation par les entités ou les objets (encapsulation des instabilités)
- au niveau de la **conception**
  - architecture stable avec modules faiblement couplés et interfaces stables
  - modifications reportées sur les seuls modules

# Conception d'architectures stables





# Complexité des systèmes

# Éléments de complexité des systèmes

- **Complexité intrinsèque**
  - **statique** : nombre et variété des éléments, fonction, interactions (nombre d'états, de configurations)  
*significative de l'effort d'ingénierie*
  - **dynamique** : dynamique des interactions (parcours dans l'espace des états, émergence)  
*significative de l'effort de test (->effort d'intégration)*
  - complexité d'**évolution** et d'**auto-organisation**
- **Indéterminisme**
  - comportement indéterministe de l'environnement
  - aléas des constituants
  - complexité humaine
- **hétérogénéité** des constituants et des métiers

# Deux approches de la complexité

- Complexité statique
  - nombre d'exigences, de fonctions, de constituants, d'interactions
  - effort de conception
  - proportionnelle à la gestion de configuration
- Complexité dynamique
  - dynamique des fonctions et des interactions
  - combinatoire des interactions
    - combinatoire des parcours dans l'espace des états (dans tous les modes aux différentes phases du cycle de vie)
    - analyse de tous les scénarii possibles
  - effort d'intégration et d'essais

# Mesure de la complexité statique

**Définition de la variété (Ashby) :** nombre de configurations ou d'états possibles d'un système dépend du point de vue sur le système :

- Exemple 1 : *la variété d'un système vu comme composé de  $n$  sous-systèmes est le produit des variétés  $v_i$  de ses sous-systèmes*

$$V = \prod_1^n v_i$$

- Exemple 2 : *la variété d'un système vu comme composé de  $n$  sous-systèmes reliés 2 à 2 de  $v$  manières (en supposant l'égalité des variétés de liaisons) est :*

$$V = v^{C_{n2}} = v^{n \cdot (n-1)/2}$$

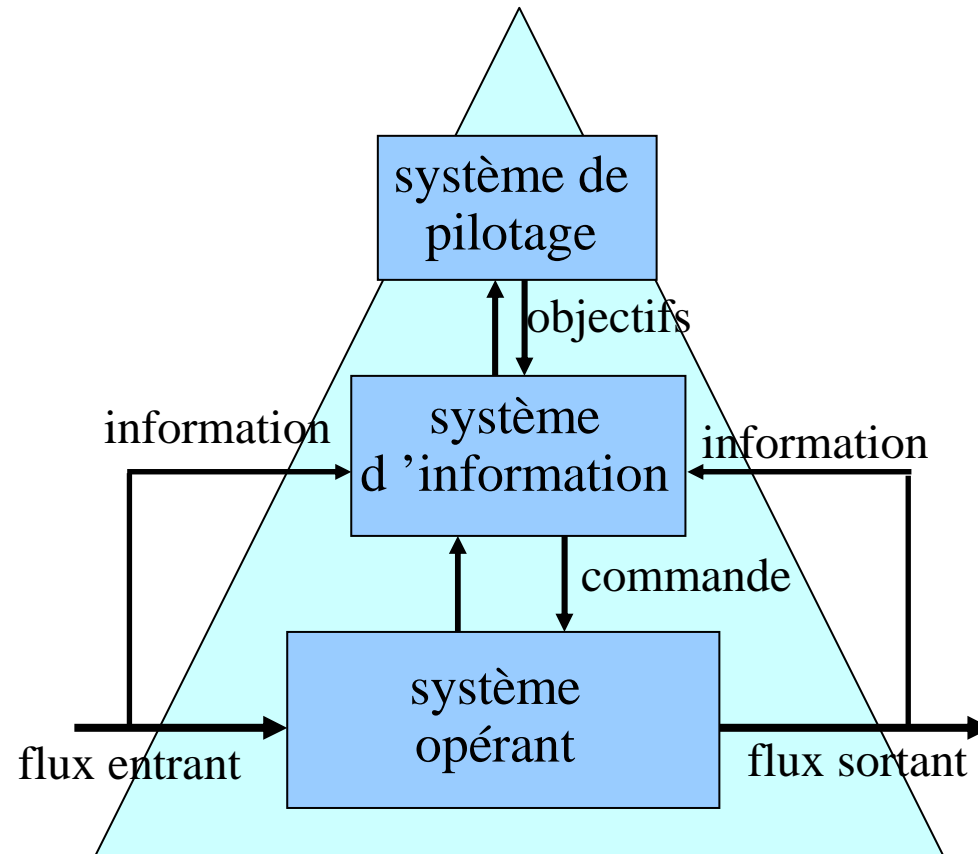
# Aspects exponentiels

- Nombre d'états des systèmes
  - explosion combinatoire des diagrammes d'états
  - et des parcours dans l'espace des états
- Impossibilité de test exhaustif
  - tester tous les parcours (graphe de structure et graphe d'appel)
  - dans tous les domaines de données
    - exemple simpliste : 1000 modules à 2 états chacun
    - $\Rightarrow V = 2^{1000}$ 
      - $2^{1000}$  tests si un test par état du système
      - $2^{89}$  nanosecondes depuis le big bang
      - $2^{220}$  particules stables dans l'univers

# Pilotage des systèmes finalisés

Régulation et systèmes finalisés

# De la régulation au pilotage

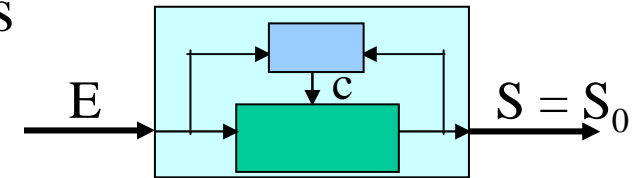


*Pilotage d'un système*

# Loi de la variété requise

Condition *nécessaire* pour qu'un système soit régulé :

- la variété de la commande doit être supérieure à la variété des perturbations d'entrée
- à environnement constant, la variété de la commande doit être supérieure à celle des objectifs



C \ E	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
C <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
C <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>4</sub>
C <sub>3</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>0</sub>

Variété suffisante : dans tous les cas le régulateur peut trouver une commande adéquate

S \ E	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
C <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
C <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>4</sub>

Variété du régulateur insuffisante

S \ E	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
C <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
C <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>4</sub>
C <sub>3</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>

Variété suffisante mais pas de commande adéquate dans tous les cas

S \ E	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
C <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>
C <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>0</sub>

Variété insuffisante mais le système est réducteur de variété

# Loi de la variété requise (2)

Autre formulation : variété de la commande :

- supérieure à la variété des entrées à sortie constante
- supérieure à la variété des sorties à entrée constante
- supérieure à la variété du système

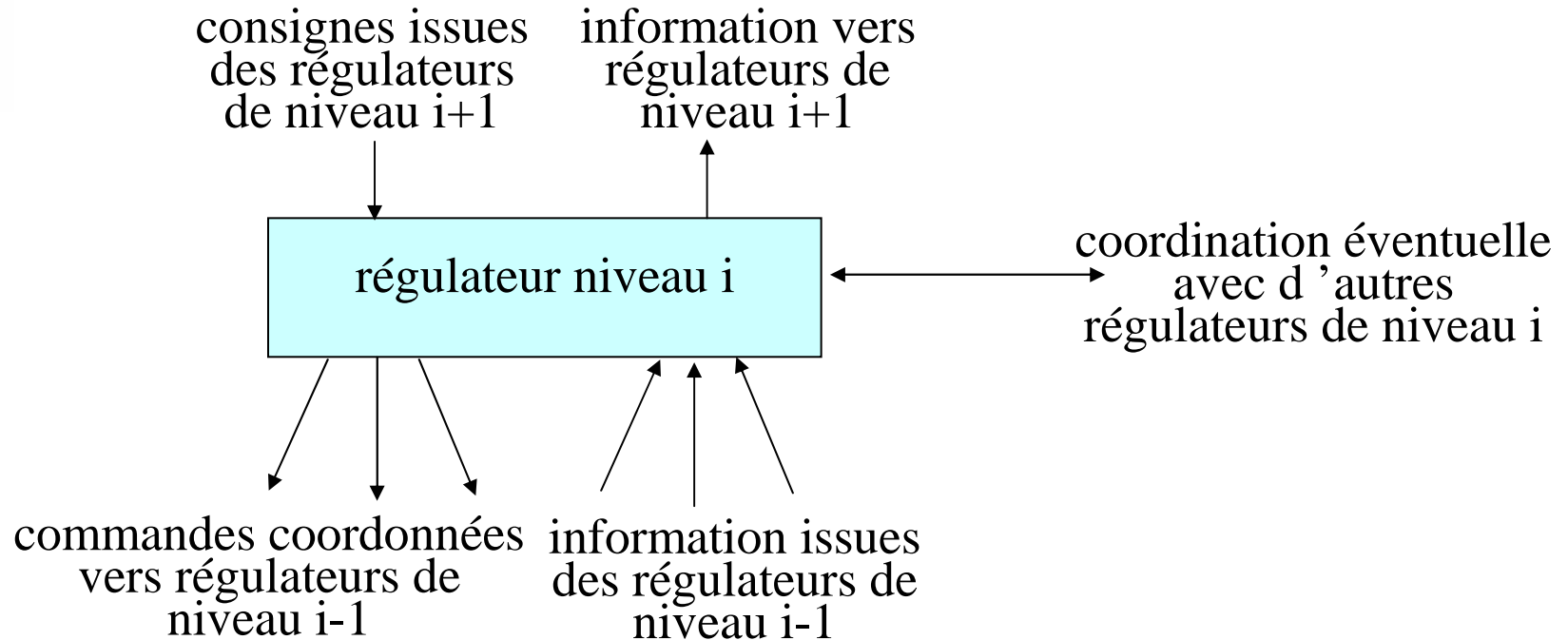
Moyens d'améliorer la régulation d'un système :

- diminuer la variété des entrées (régulation passive)
- augmenter la variété de la commande (régulation active)
- augmenter la variété des objectifs en augmentant la plage des sorties admissibles (régulation par tolérance)
- diminuer la variété du système piloté en le rendant réducteur de variété (ex : organiser avant d'informatiser)

# Applications de la loi d ' Ashby

- Organiser (si possible) avant d 'informatiser
- Conférer aux logiciels des réserves de variété (redondances) pour faire face à des évolutions des objectifs, de l 'environnement, et du système piloté
  - pas de factorisations systématiques
  - couches d 'interfaces stables structurant l 'architecture
- la variété du système ingénierant doit être au moins égale à celle du système ingénieré
- le rattrapage d 'un problème dans un projet demande un effort d 'autant plus grand que l 'on a attendu pour le mettre en œuvre

# Hiérarchies de régulation



- intégration verticale : hiérarchie de régulateurs
- intégration horizontale : coordination entre régulateur de même niveau

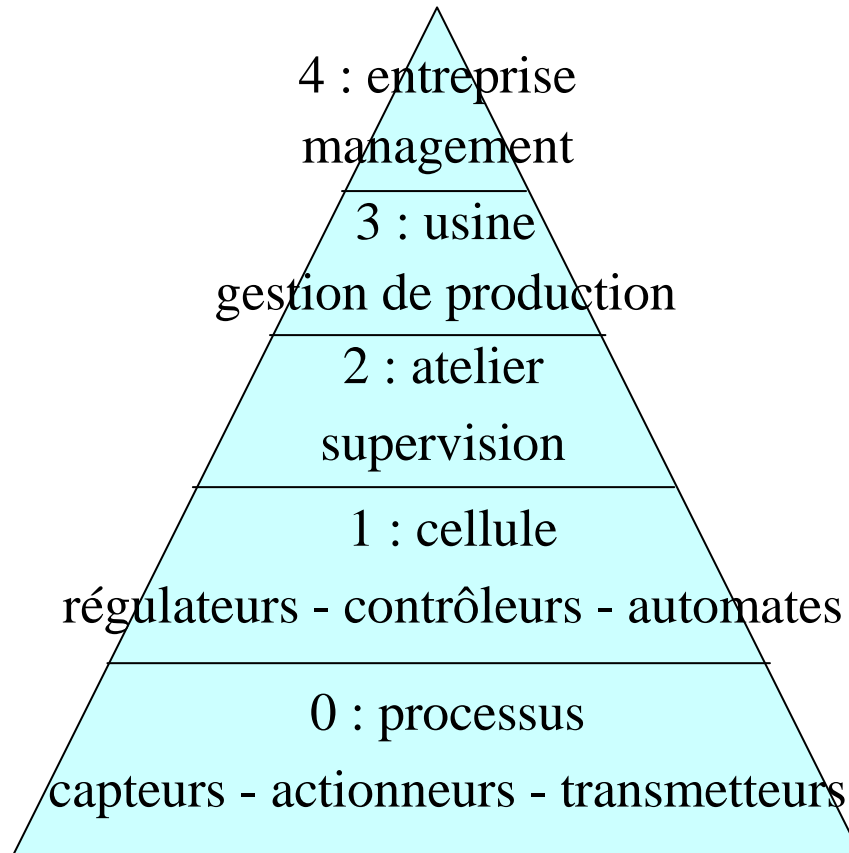
# Hiérarchie de décision et hiérarchie temporelle

Hiérarchie de régulateurs en relation avec :

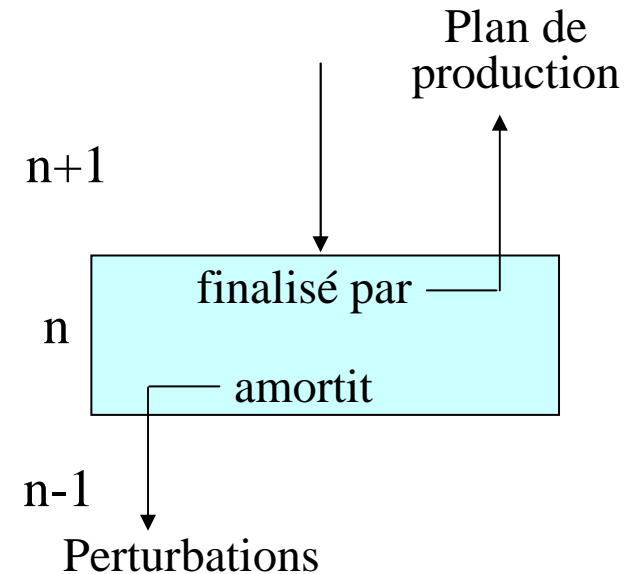
- la hiérarchie de finalité
- la hiérarchie d' emboîtement des sous systèmes
- la hiérarchie des niveaux temporels

niveau de décision	domaine d' action	périodicité	horizon
stratégique	très global	faible	long terme
tactique	moyen	moyenne	moyen terme
réflexe	faible	forte	court terme

# Application aux Systèmes d'Information de Production



*Pyramide de la CIM (Computer Integrated Manufacturing)*



- Emboîtement structurel
- hiérarchie de pilotage
- Hiérarchie temporelle

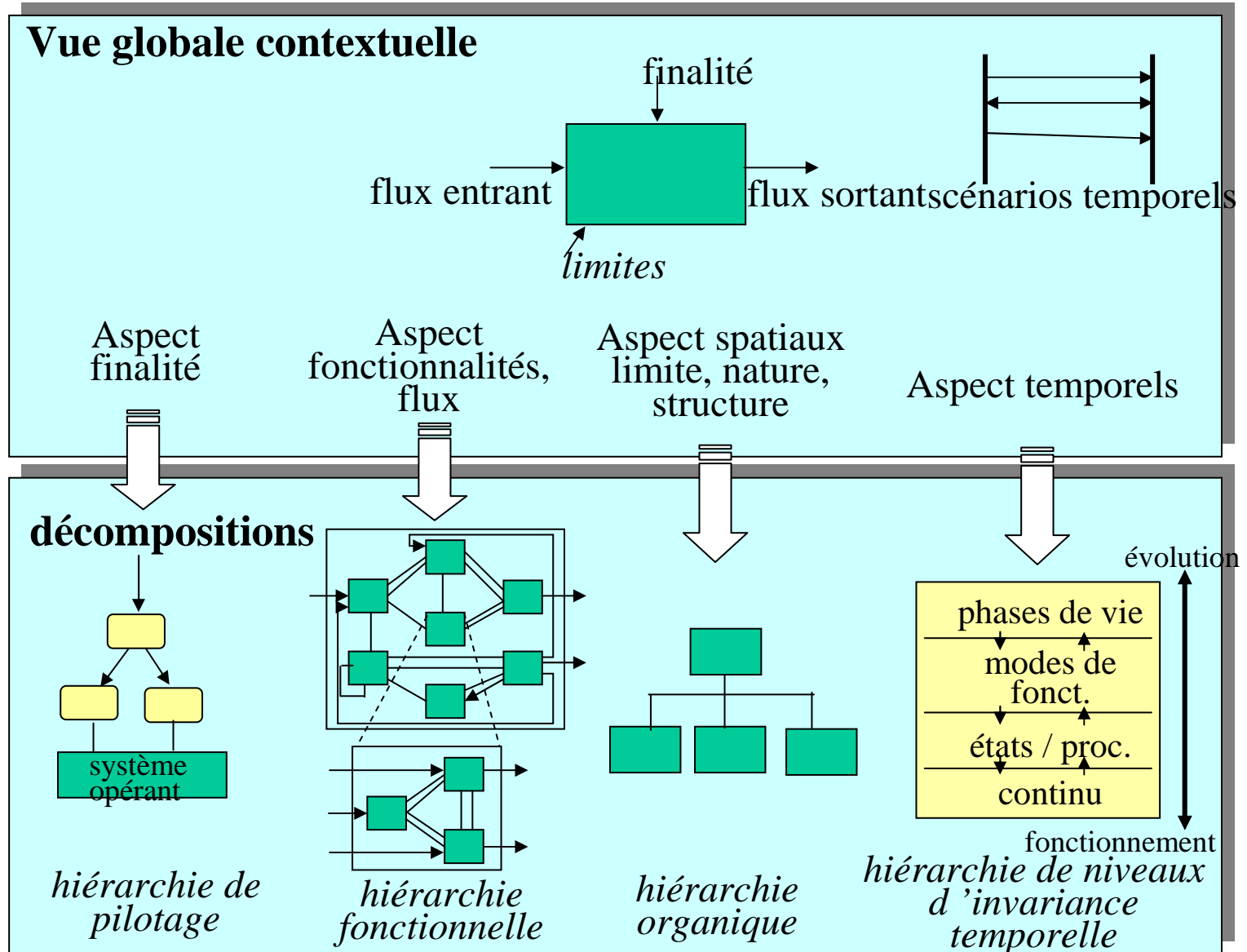
# Typologie des systèmes autorégulés

Classification des systèmes en fonction des caractéristiques de leur régulateur

types	caractéristiques régulateur	propriétés fonctionnelles	exemple en CIM
Système réflexe	arc direct entrée-sortie	stabilité	thermostat élémentaire
Système asservi	programme à paramètres fixes, modulés par les sorties	stabilité	robot avec régulation en position et en vitesse
Système séquentiel	programme enregistré, modulé par les entrées	enchaînement	robot de soudage par points
Système auto-adaptatif	programme à paramètres variables modulé par les résultats	adaptation optimisation	optimisation en automation industrielle
Système heuristique	programme modifiable en fonction de l'expérience	auto-organisation apprentissage	ateliers flexibles, système productif

*Niveaux de régulation*

# Synthèse sur les systèmes





# L 'approche système

# Approches analytique et systémique

## **Approche analytique**

Réductionniste, cartésienne

- appréhende un système en le décomposant en éléments de plus en plus simples
- risque d'ignorer des interactions à l'origine de propriétés importantes
- s'applique aux systèmes simple ou « compliqués »

## **Approche système**

holistique, systémique

- appréhende un système dans sa globalité en tentant d'en construire des modèles qui permettent de prévoir son comportement
- s'applique aux systèmes complexes, non analysables par décomposition