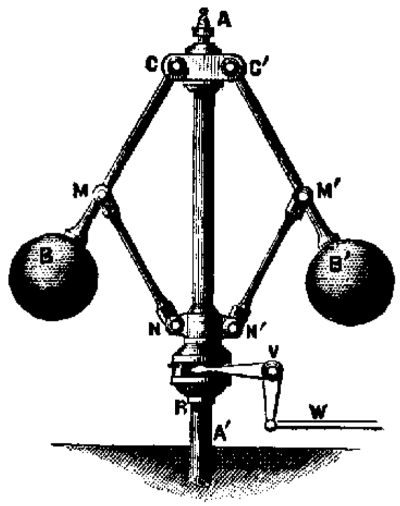
# Représentation et analyse des systèmes linéaires

# Cours 1

# Introduction à l'étude des systèmes de commande



Enseignant Denis Arzelier : directeur de recherche au LAAS-CNRS

Contacts Tel : 05 61 33 64 76 - email : arzelier@laas.fr

Web-page http ://homepages.laas.fr/∼arzelier

Bureau B29 DAS

Organisation du cours

❶ 4 cours 1h15 : 5h

- ➪ Cours magistral en amphi avec transparents + Support de cours polycopié

❷ 8 petites classes 1h15 : 10h

- ➪ Cours technique + Exemples d'application

❸ 4 bureau d'études 2h30 : 10h

- ➪ Deux B.E. classiques sur papier
- ➪ Deux exemples d'application aéronautique avec support MATLAB

❹ 1 examen final : 1h15

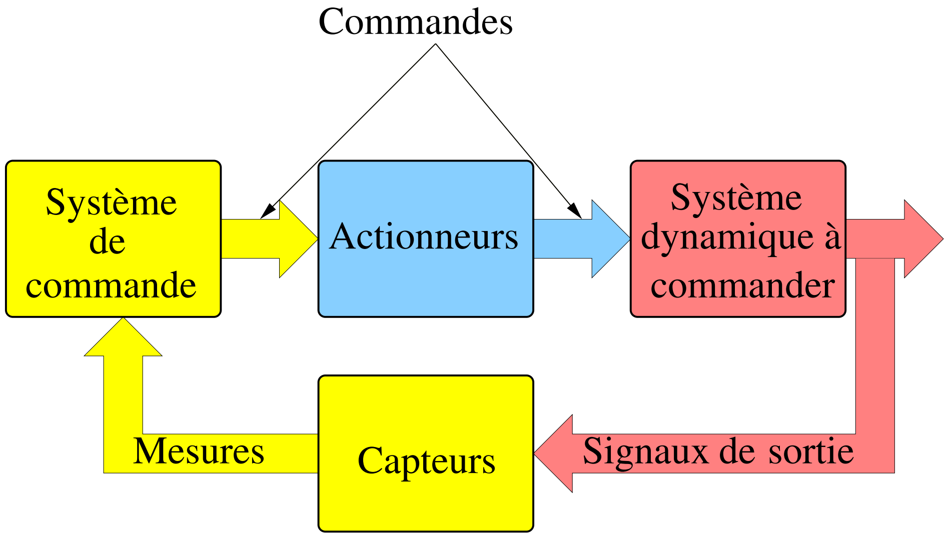
Durée totale = 26h15

▼ **Définition 1** : *Automatique*

*Ensemble des disciplines scientifiques et techniques utilisées pour la conception de systèmes de commande en vue du contrôle des processus dynamiques naturels et artificiels*

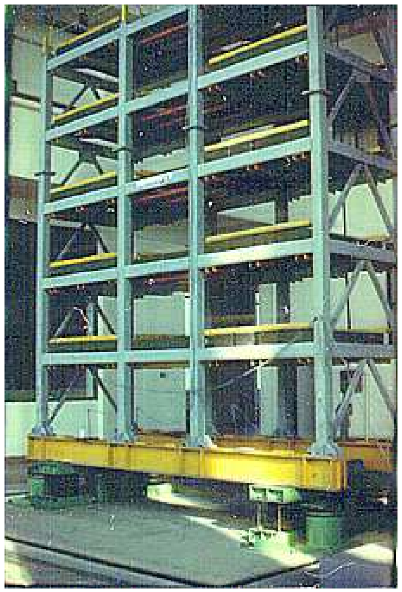
Théorie de la commande des systèmes **dynamiques** :

- Commande passive :
  changements structurels pour changer la dynamique
- Commande en boucle ouverte :
  connaissance du système permet de générer les entrées
- Commande active (boucle fermée) :
  utilisation des actionneurs et capteurs pour générer les commandes (l'information circule dans une boucle)



Commande passive de fusée :

- Fusées chinoises équilibrées par une flèche
- Aeronautics Learning Laboratory for Science, Technology and Research (ALLSTAR)

Commande passive de structures :

- Structure flexible avec amortisseurs
- Isolation vibratoire (sismique, acoustique)
- Institute of Earthquake Engineering and Engineering seismology (IZIIS)

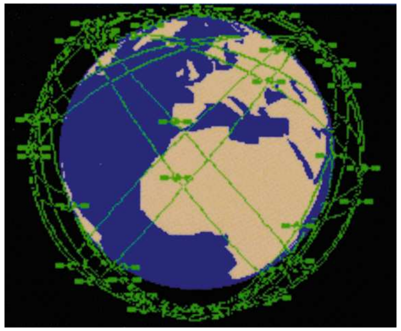
Commande passive des écoulements :

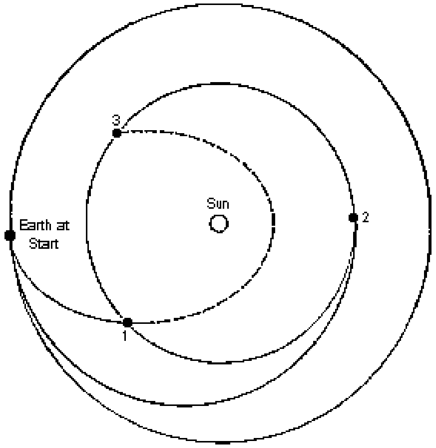
- Gicleur asymétrique pour jet gaz-liquide à haut volume
- Center for turbine innovation and research (TIER)

- Commande passive de combustion (flamme pulvérisée)
- Distribution de l'air, géométrie, conditions aux limites, énergie cinétique, distribution du tourbillon
- Combustion laboratory (University of Maryland)

Machine à laver :

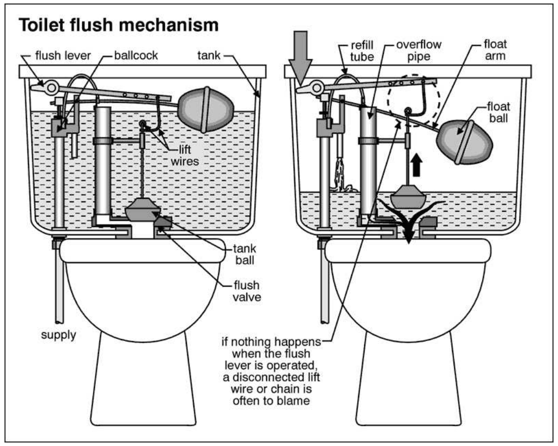
- Fonctionnement par cycles automatiques
- Pas de mesure de la saleté




Optimisation de trajectoires spatiales :

- Guidage de lanceurs
- Mise et maintien à poste de satellites en formation
- Trajectoires interplanétaires
- Rendez-vous spatial
- Fermeture de la boucle par Télé-opérations par le sol

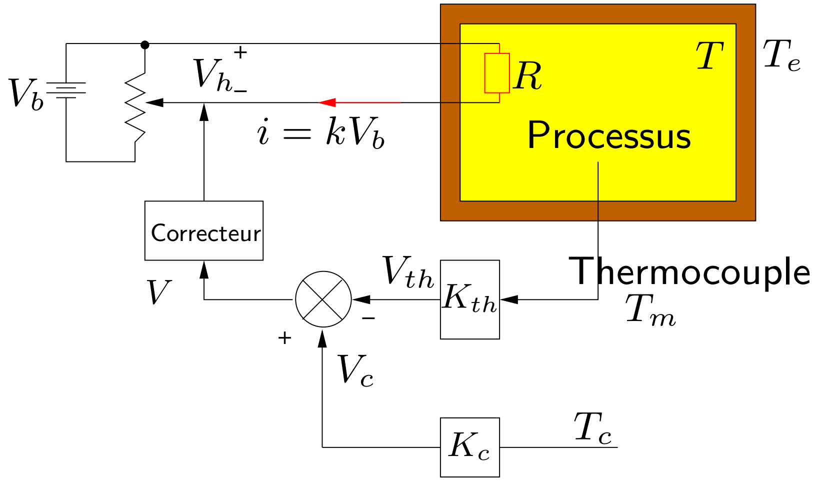



Régulation de niveau :

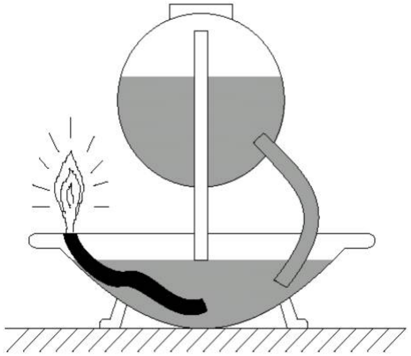
- Signal de consigne (hauteur d'eau finale)
- Mesure de la hauteur d'eau par un flotteur (capteur)
- Mise en oeuvre d'un robinet et d'une tringlerie (actionneur)

Asservissement de température :

- Signal de consigne (température)
- Correcteur (système de commande)
- Mesure de la température par un thermocouple (capteur)
- Circuit + résistance chauffante (actionneur)



Période pré-industrielle

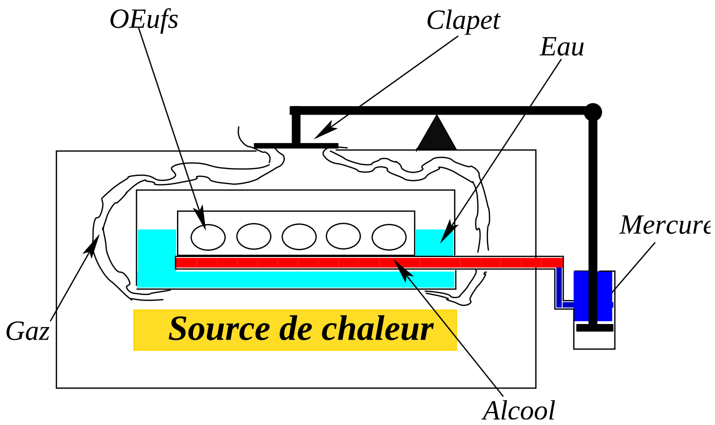


Régulations de niveau et de débit :

- Clepsydre : Ktesibios d'Alexandrie (270 AC), Héron d'Alexandrie (150 AC)
- Clepsydres, pompes à eau, régulateurs de flamme : Al-Jazari (*Automata* 1315)

Régulation de température :

- L'incubateur *Athenor* de Cornelius Drebbel (1624)
- Becher (1680), Réaumur (1754), Henry (1771), Bonnemain ( 1777)



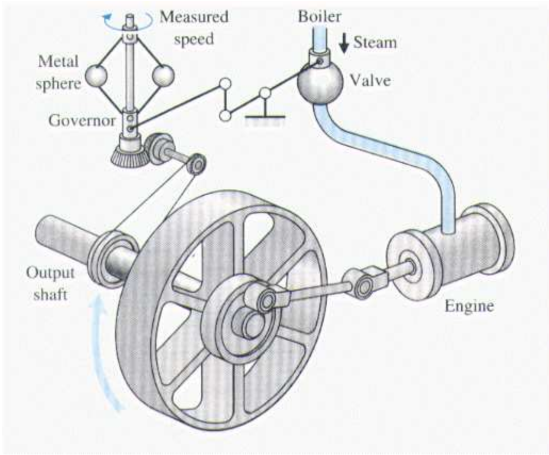
## Période industrielle

Régulation des moulins à vent :

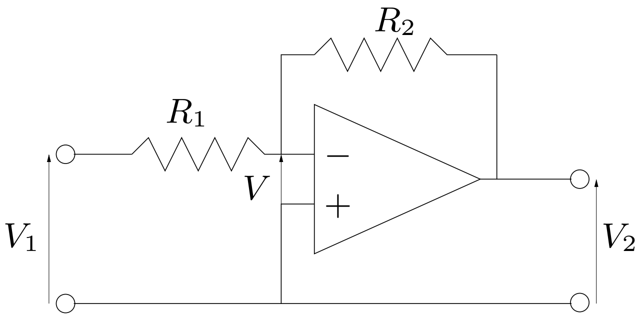
- Régulation du flux de grain (1588)
- Fantail : Edmund Lee (1745)
- Régulateur à double pendule : Thomas Mead (1780)

Régulation à gouverne centrifuge :

- Régulation du moteur à vapeur de James Watt : Boulton et Watt (1788)
- Stabilité des systèmes bouclés : G.B. Airy (1840), J.C. Maxwell (1868), E.J. Routh (1877), A. Hurwitz (1895)



## Périodes classique et moderne

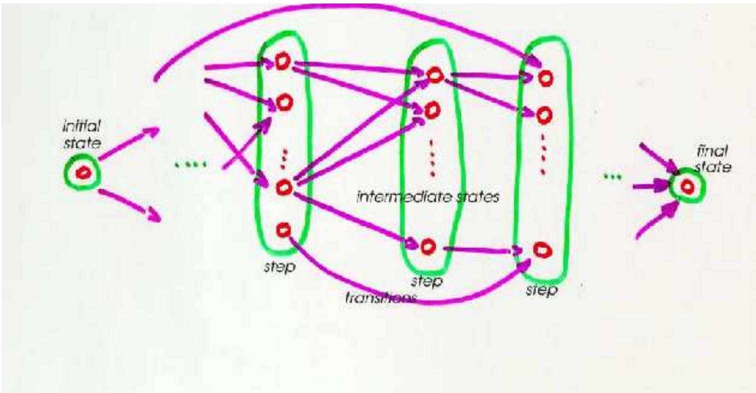



**Théorie fréquentielle des servo-mécanismes :**

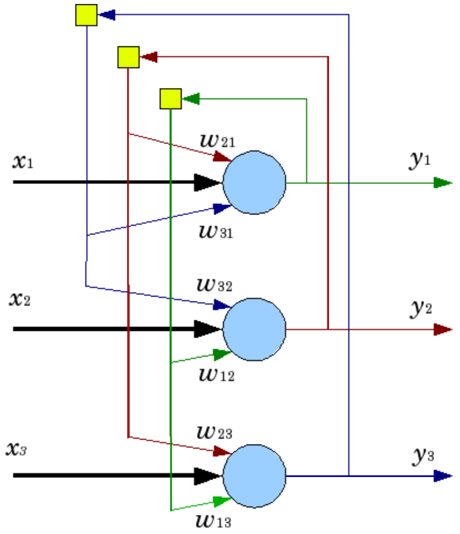
- Rétro-action négative pour les amplificateurs : H.S. Black (1927)
- Théorie des servo-mécanismes : H. Nyquist (1932), H.W. Bode (1938), A.C. Hall (1940), N.B. Nichols (1947)
- Théorie des systèmes échantillonnés : C.E. Shannon (1950), E.I. Jury (1960)

**Théorie de la commande optimale, stochastique, non linéaire :**

- Commande optimale et espace d'état : R. Bellman (1957), L.S. Pontryagin (1958), R.E. Kalman (1960)
- Commande non linéaire : Y.A. Tsypkin (1955), V.M. Popov (1961), V.A. Yakubovich (1962), G. Zames (1966)



## Epoque post-moderne

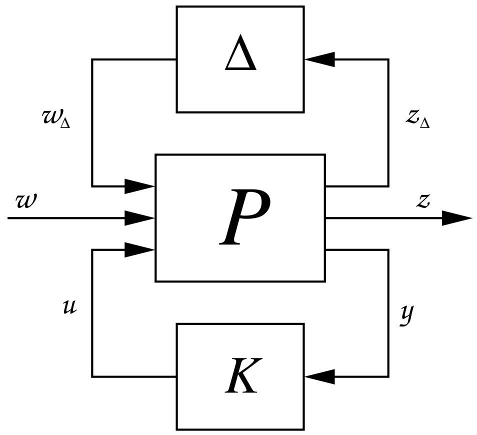



Commande neuronale, floue et intelligente, systèmes experts, apprentissage :

- Logique floue : L. Zadeh (1973)
- Réseaux de neurones : J. Hopfield (1986)
- Apprentissage : V. Viddyasagar (1997)

Méthodes à base de modèles :

- Commande robuste : G. Zames (1971), J.C. Doyle (1981), M.G. Safonov (1982), S. Boyd (1994)
- Commande adaptative et non linéaire : K.J. Åström (1989), P. Kokotovic (1996), E. Sontag (1998)



Contrôle d'attitude d'un satellite

- Mode normal
- Mode de contrôle d'orbite
- Mode de survie
- Mode de transition

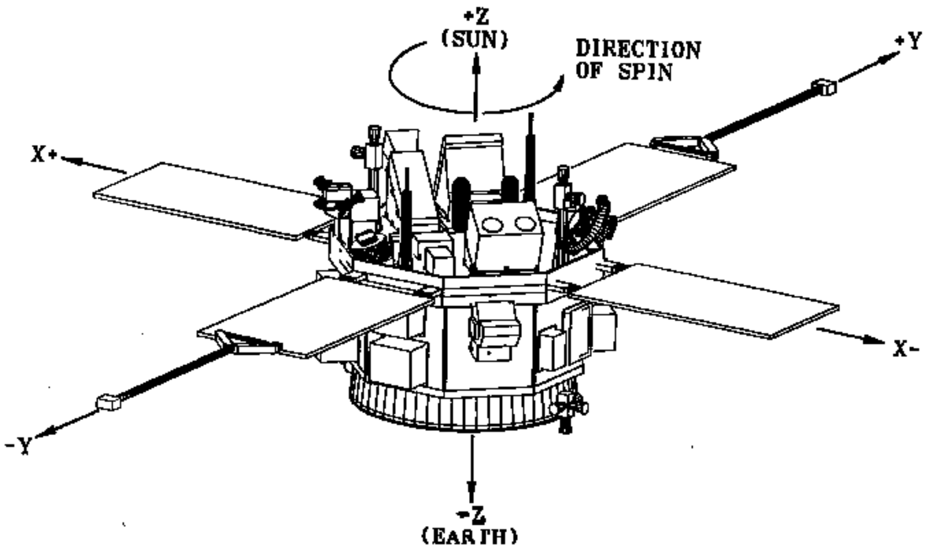
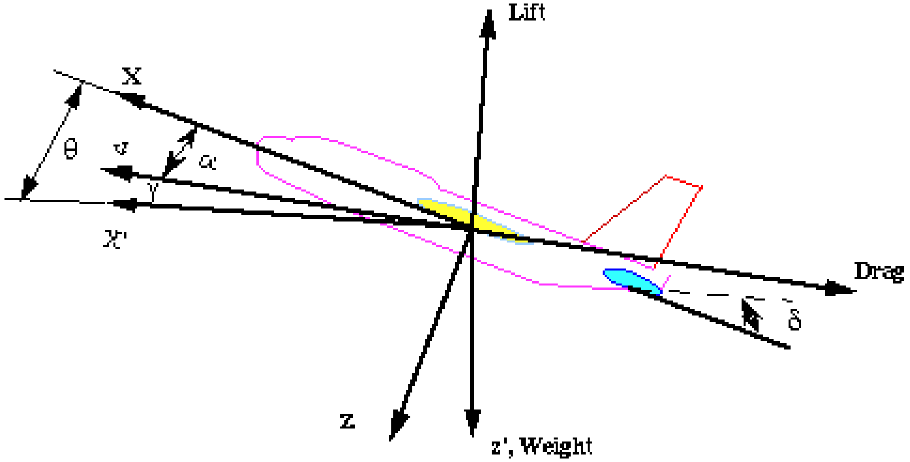



FIGURE 1 – Satellite FRD5

- Orientation (attitude) à contrôler (antennes, capteurs, panneaux solaires)
- Pointage géocentrique, inertiel...
- Perturbations gravitationnelles, bruits électriques, flexibilité, vents solaires

Commande longitudinale d'un avion civil





- Contrôle de la vitesse d'avancement, de la pente $\gamma$, de l'assiette longitudinale $\theta$ et de l'altitude $h$
- $\delta$ gouverne de profondeur et poussée des moteurs
- Rafales, charge variable, confort des passagers...

## Commande de turbo-reacteur

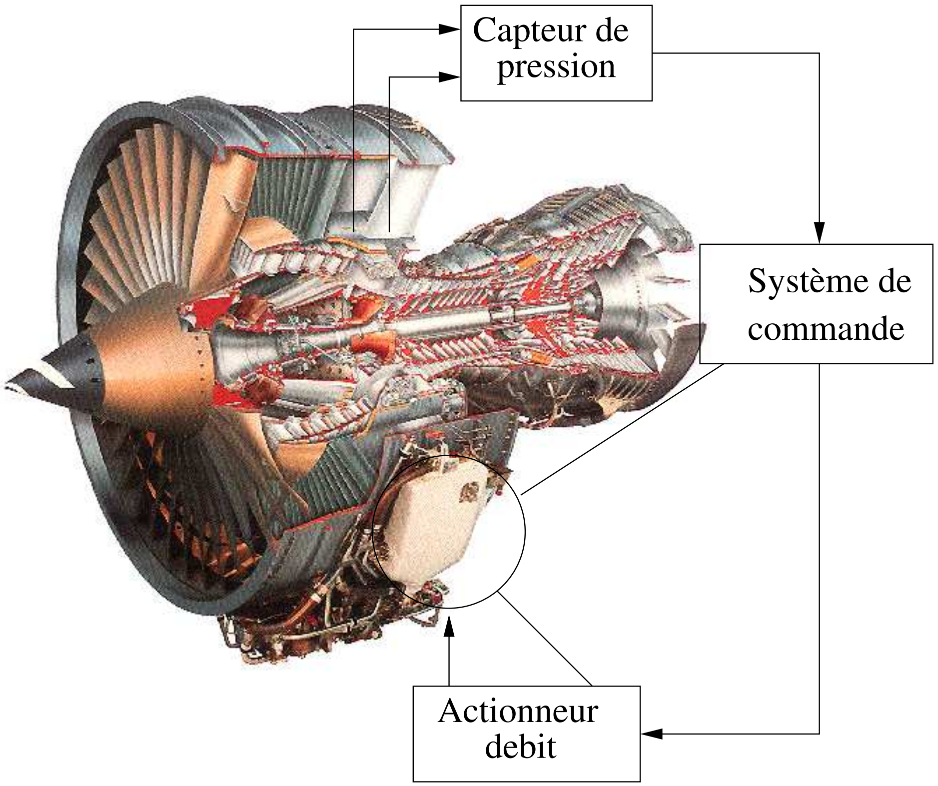


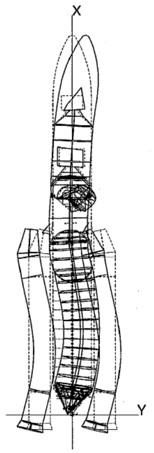

FIGURE 2 – Moteur SNECMA CFM56

- $\sum$ de compression : régime BP
  - Surtempérature à l'entrée HP,
  - Surrégimes HP, BP

  Perte de vitesse, vibrations aérodynamiques, inversion de poussée
- $\sum$ de combustion : régulation débit carburant
  - Surpressions BP, HP
  - Modélisation, variables non mesurables

  Extinctions pauvres et riches, émissions de particules, consommation

**Pilotage robuste d'un lanceur**

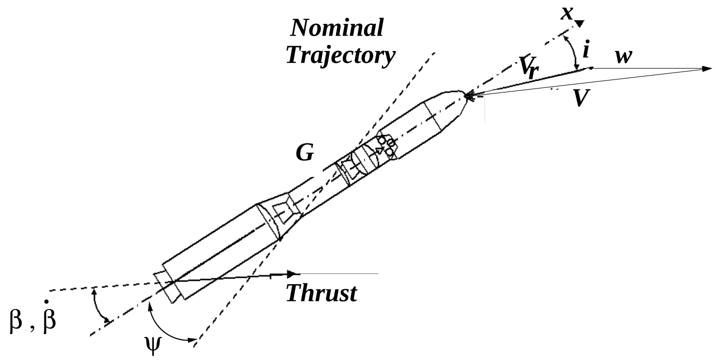



Phase de Guidage :

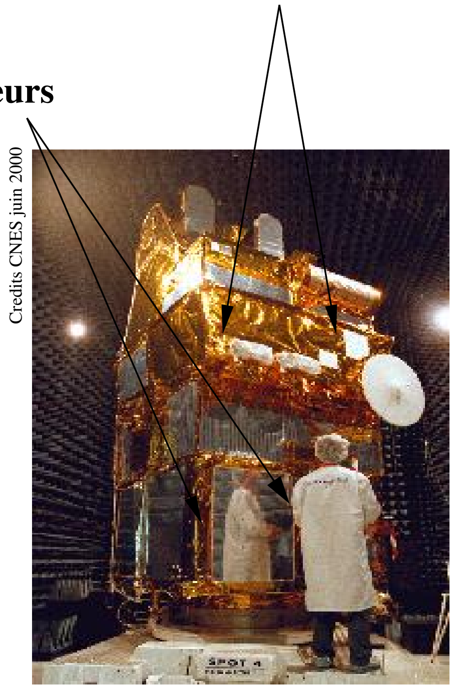
- Asservissement de G sur une trajectoire optimale et fournit les consignes de pilotage
- Point et précision d'injection
- Minimisation de la consommation ou temps de vol

Phase de pilotage :

- Limiter l'incidence aérodynamique en phase atmosphérique
- Ordre de braquage des tuyères
- Minimisation de la consommation, des efforts sur le lanceur

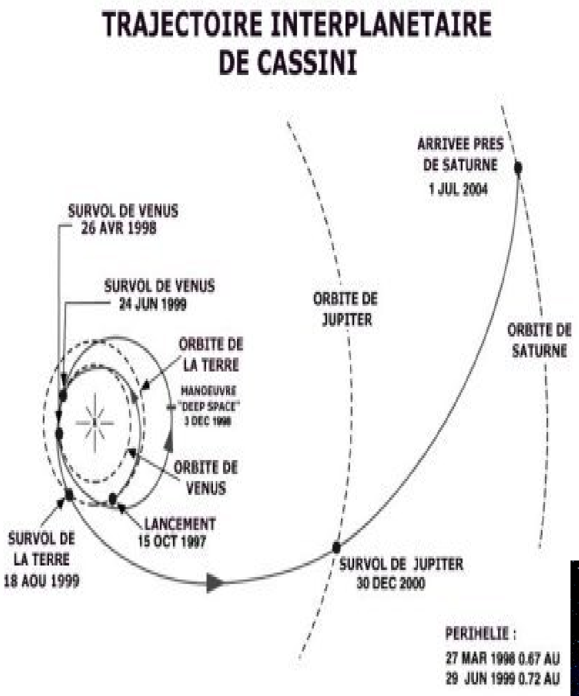


# Différents types de commandes : résumé




Credits CNES juin 2000

Spot 4




Credits NASA/JPL–Caltech – Traductions annotations Cedric Berner

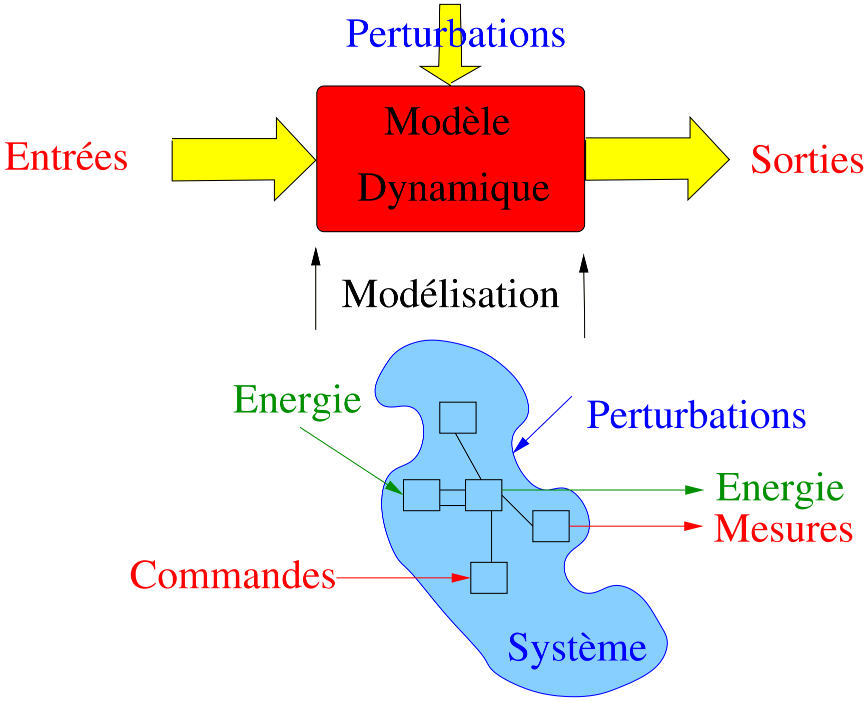
Credits CNES nov. 2003 ill. D. Ducos

Demeter au dessus du golfe de Corynthe

# Objectifs du cours

- Maîtrise du vocabulaire spécifique à l'Automatique
- Maîtrise des principales notions liées à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques :
  - Modélisation pour l'Automatique (notion d'état)
  - Stabilité des systèmes dynamiques
  - Les systèmes de commande à contre-réaction
- Maîtrise des outils mathématiques associés :
  - Outils graphiques (réponses en fréquences, lieu des racines)
  - Outils algébriques (Routh-Hurwitz, calcul opérationnel)
  - Outils d'analyse complexe (transformation conforme)
- Ouverture sur la problématique de la synthèse de systèmes de commande

Signaux et **systèmes dynamiques**




- **Modélisation** : expression des lois de la physique
- **Modèle mathématique dynamique** : ensemble des lois mathématiques régissant la causalité entrées-sorties : les sorties présentes dépendent des entrées passées et actuelles ($\neq$ statique : les sorties présentes ne dépendent que des entrées présentes)

1- Définir le système étudié et ses composants élémentaires

2- Formuler le modèle mathématique idéal et dresser la liste des hypothèses à retenir

3- Ecrire les lois de la physique régissant le processus :

4- Définir le modèle dédié à l'Automatique :

Modèle de comportement dynamique

- fonction de transfert (modèle externe)
- équations d'état (modèle interne)

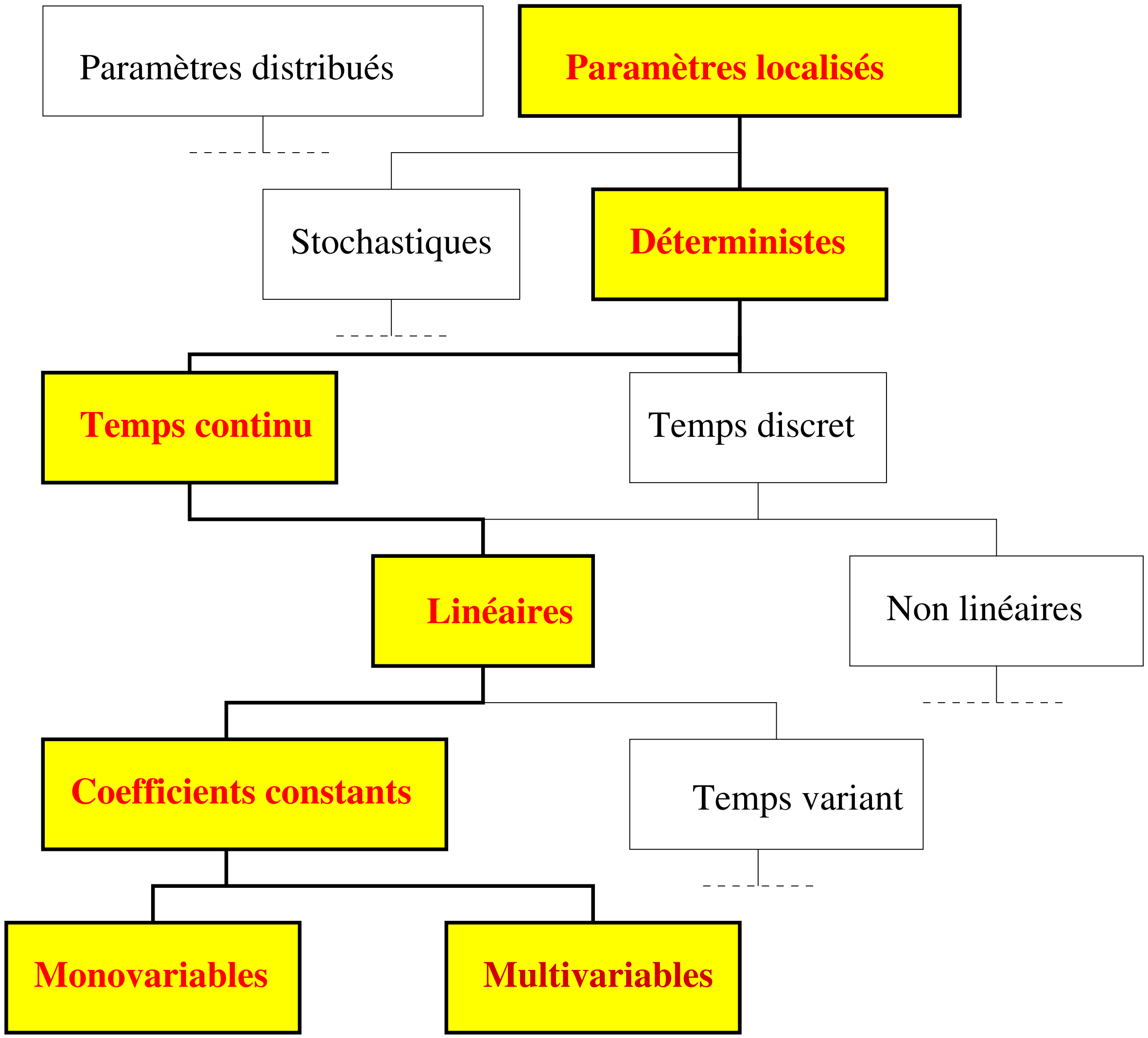
✍ **Remarques 1** : *compromis précision/complexité du modèle*

1- Système physique réel

2- Modèle physique idéal (Décomposition en blocs idéaux) → Aggrégat de systèmes élémentaires

3- Modèle mathématique idéal (application des lois de la physique) → Modèle de connaissance

4- Modèle mathématique réduit (linéarisation...) → Modèle de comportement dynamique



Paramètres distribués
Paramètres localisés
Stochastiques
Déterministes
Temps continu
Temps discret
Linéaires
Non linéaires
Coefficients constants
Temps variant
Monovariables
Multivariables

Principe de superposition :

$$\text{Si } e(t) = \sum_{k=1}^{n} e_k(t) \text{ alors } s(t) = \sum_{k=1}^{n} s_k(t)$$

Principe d'homogénéité :

Pour $\alpha e(t)$, la sortie est $\alpha s(t)$

Contre-exemples :

$$s = me + b \qquad\qquad s = e^3$$

Nota :

- Plus "faciles" à commander
- Comportement dynamique (presque prévisible)
- Conserve l'essentiel du comportement dynamique d'un système non linéaire