



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



POLYTECH[®]
NANCY

Automatique continue

Control Engineering

Hugues GARNIER

hugues.garnier@univ-lorraine.fr

Version du 7 septembre 2020

Volumes horaires

- **Automatique continue**

- | | |
|---|-----|
| – 5 séances de cours (<i>de 2h</i>) | 10h |
| – 6 séances de TD (<i>de 2h</i>) – énoncés en <i>anglais</i> | 12h |
| – 3 séances de TP (<i>de 4h</i>) - New - énoncés en <i>anglais</i> | 12h |
-

Intervenant en cours

- H. Garnier

Intervenants en TD et TP

- H. Garnier (1 Gr)
- F. Collin (1 Gr)

- Intervenants en TP

- H. Garnier
- F. Collin
- C. Lenic

Contrôle des connaissances

- Devoir surveillé (2h00) – énoncé en anglais



- Devoirs à la Maison (DM) – énoncé en anglais
 - A faire en binôme

« *J'entends, j'oublie. Je vois, je me souviens. Je fais, je comprends.* »

Confucius

- Compte-rendu (CR) de TP – énoncé en anglais

– A faire en binôme

- Calcul de la note finale

$$\text{Note Auto} = 0,5 \text{ DS final} + 0,2 \text{ DM} + 0,3 \text{ CR TP}$$

Avertissement & Conseil

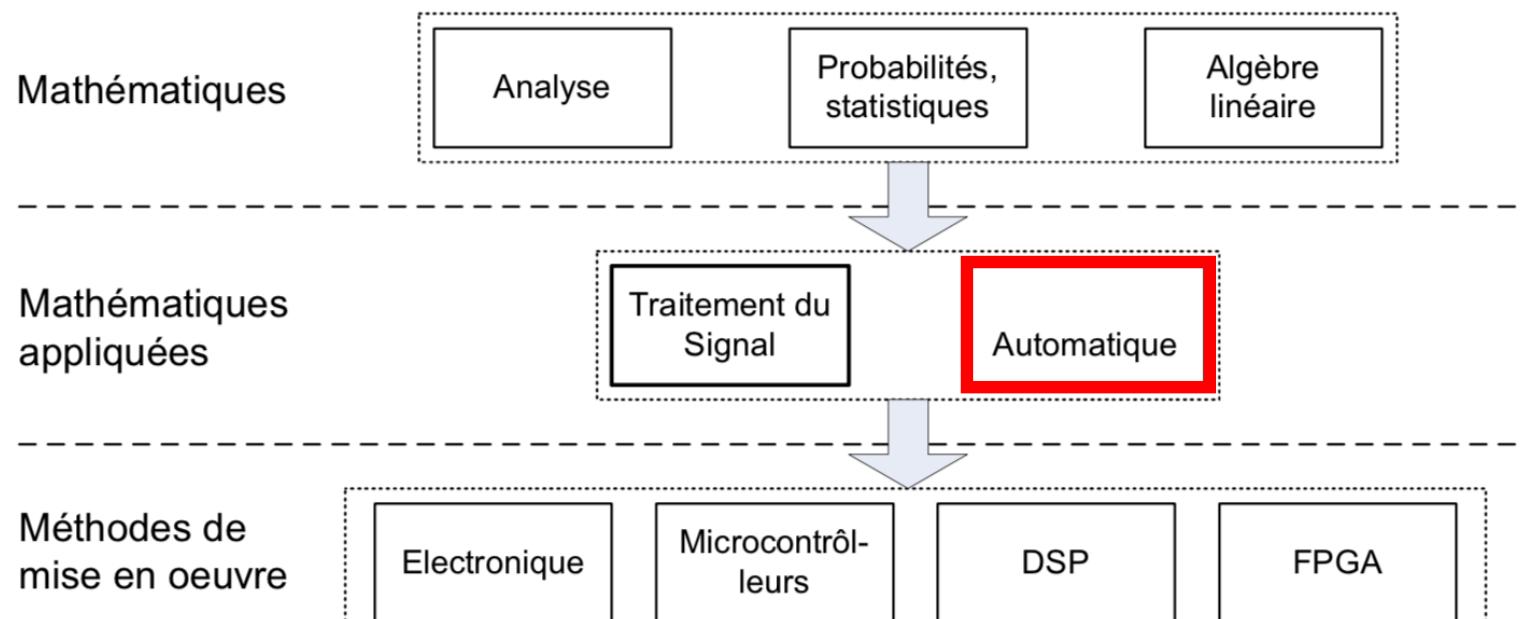
- A chaque cours, vous devrez parfaitement assimiler les nouvelles connaissances pour être capable de comprendre la suite
- Au risque d'être très vite dépassé, vous devez :
 - relire systématiquement vos notes personnelles et les transparents du cours précédent
 - apprendre les définitions
 - connaître les formules importantes
 - refaire les exercices vus en cours et en TD
- **Conseil** : vous constituer un résumé personnel au fur et à mesure des séances de cours



Aucun écran n'est autorisé pendant les séances de cours

L'Automatique dans le cursus Ingénieur

- L'automatique est, avec le traitement du signal, la couche charnière entre les mathématiques et les technologies



- L'automatique s'appuie sur des bases solides en mathématiques mais elle est totalement indépendante des technologies (électroniques, informatiques,...) de mise en oeuvre

Objectifs de l'EC pour l'ingénieur & Prérequis

Objectifs

- Comprendre la problématique de la **commande automatique**
- Donner des outils et méthodes pour :
 - analyser les systèmes dynamiques linéaires continus
 - Synthétiser/concevoir des correcteurs

Prérequis

- Maths : analyse de fonctions, décomposition en éléments simples, ...
- Transformée de Laplace
- Résolution d'équations différentielles par transformée de Laplace

Ouvrages de référence & sites web

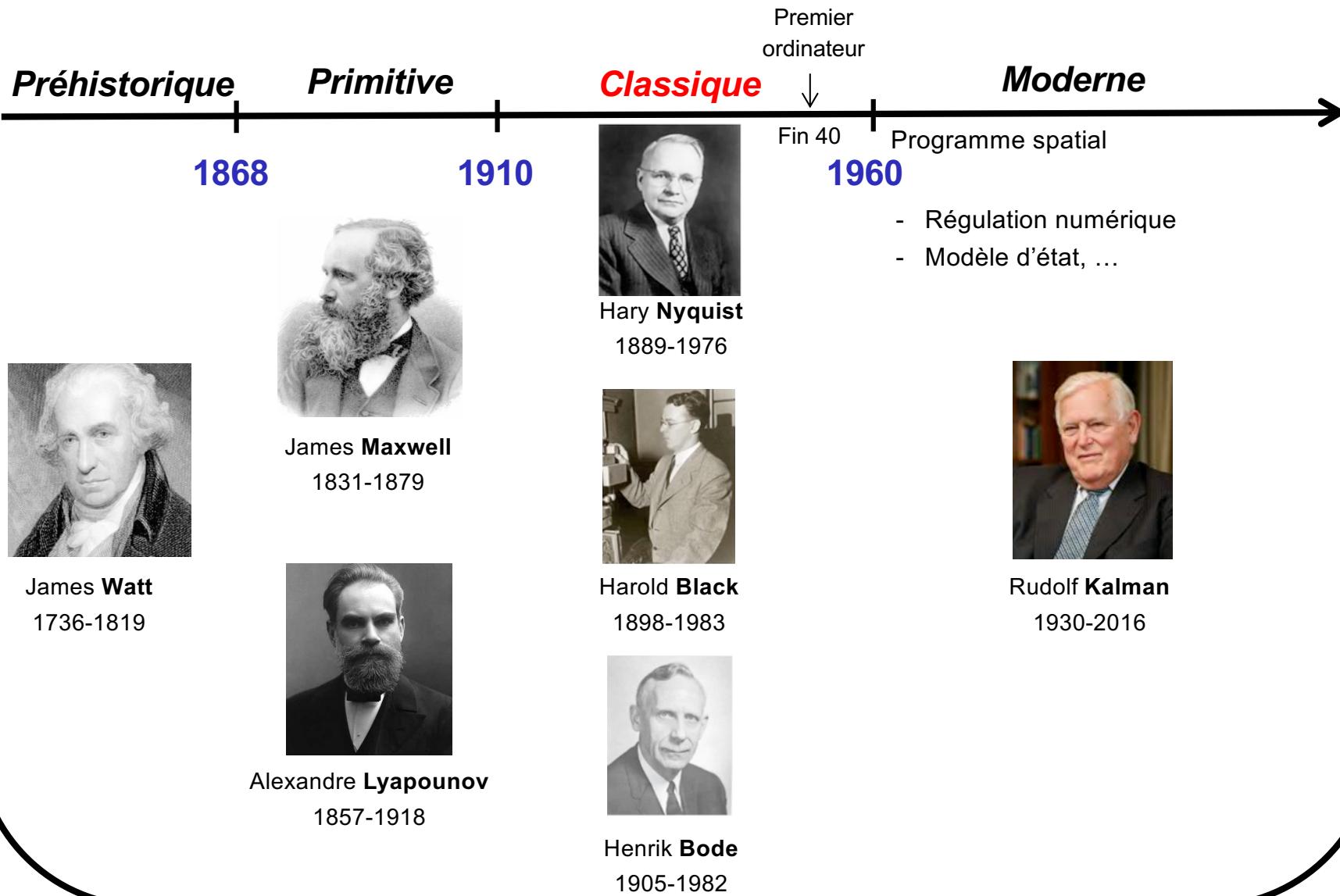
- Site web pour le cours : *support de cours, énoncés de TD/TP et DM*
<http://w3.cran.univ-lorraine.fr/hugues.garnier/?q=content/teaching>
- Références conseillées
 - B. Pradin, G. Garcia, *Modélisation, analyse et commande des systèmes linéaires*, Presses Universitaires du Midi, 2e édition, 2010.
 - K.J. Åström and R. Murray, *Feedback Systems. An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2009
http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09.pdf
 - Education channel on *Control System Lecture* de Brian Douglas
<https://www.youtube.com/user/ControlLectures/>

D'autres bonnes références pour approfondir le cours

- J-M. Flaus. *La régulation industrielle*, Hermès 1994
- P. de Larminat . *Automatique. Commande des systèmes linéaires*, Hermès 1999
- H. Bourlès. *Systèmes linéaires. De la modélisation à la commande*, Lavoisier 2006
- G. Boujat, P. Anaya. *Automatique industrielle*, Dunod, 2007
- O. Le Gallo. *Automatique des systèmes mécaniques*, Dunod, 2009
- P. Prouvost. *Automatique : contrôle et régulation*, Dunod, 2010
- Y. Granjon. *Automatique*, Dunod, 2010

- G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeni. *Feedback Control of Dynamic Systems*. Prentice Hall, 2009
- N.S. Nise. *Control Systems Engineering*, 6th Ed., John Wiley, 2010
- K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th Ed., Prentice Hall, 2010
- W. Levine, *The Control Handbook*, 2th Ed. CRC Press, Vol. 1, 2010
- R. Dorf, R. Bishop, *Modern Control Systems*, 12th Ed., Prentice Hall, 2011
- G. Goodwin, M. Salgado, S. Graebe, *Control System Design*, Pearson Education, 2015

La ligne du temps en Automatique

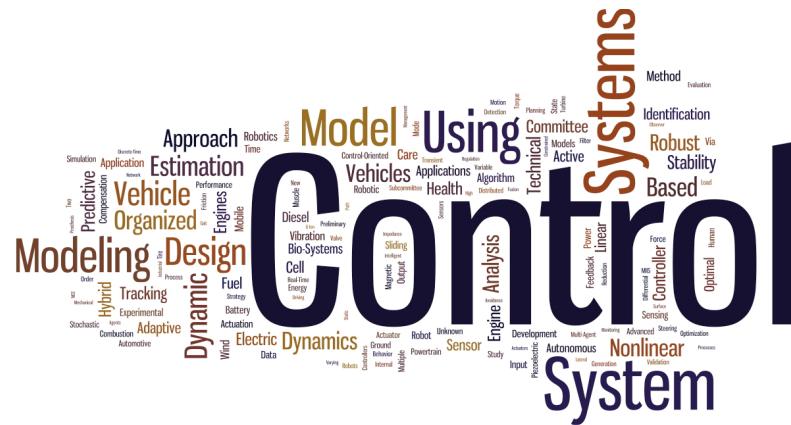


Quelques moments forts de l'histoire de l'Automatique

- Les mécanismes de **régulation** sont à la base du fonctionnement des systèmes créés et utilisés par l'homme
- Avec la révolution industrielle et le **régulateur** de **Watt**, sont apparues les premières formalisations modernes : modélisation (avec les équations différentielles inventées par **Newton**) et stabilité
- Les travaux du mathématicien et astronome anglais **G. Airy** sont le point de départ de la théorie des systèmes. Il fut le 1^{er} à tenter une analyse du **régulateur** de Watt
- 1868 : le physicien écossais **J. Maxwell** publie une première analyse mathématique convaincante et explique certains comportements erratiques observés parmi les nombreux **régulateurs** en service. Ses travaux furent le point de départ de nombreux autres
- Suivent les travaux sur la stabilité de **H. Poincaré** et **A. Lyapounov**
- La caractérisation de la stabilité est ensuite établie indépendamment par les mathématiciens **A. Hurwitz** et **E. Routh**
- Années 1930 : les recherches aux Bell Telephone Laboratories sur les amplificateurs sont à l'origine de travaux encore enseignés aujourd'hui, notamment les diagrammes de **Nyquist** et de **Bode**

Définition - Automatique

- **Automatique (*control*)**
 - ensemble des sciences et des techniques pour l'étude des systèmes fonctionnant **sans intervention humaine**



- cherche à concevoir des commandes (*automatiques*) permettant de modifier le comportement des systèmes

Automatique

- Permet de faire des actions « impossibles » pour l'homme
- Discipline qualifiée souvent de « *cachée* » ou « *d'enfouie* »
- S'appuie sur beaucoup de maths *sympas* !
- Est au cœur de tout !

Automatique ou Automatisme ?

- Il faut distinguer deux domaines d'intervention de l'Automatique :
 - **Automatique pour les systèmes à événements discrets (SED)**
- Leurs variables peuvent prendre uniquement deux états : marche/arrêt
 - variables d'un distributeur à café : présentation d'un gobelet, apport de poudre, de sucre, écoulement de l'eau pendant une durée fixe
- On parle **d'automatismes** qui permettent d'effectuer une séquence d'actions pré-établies fondées sur des fonctions logiques combinatoires ou séquentielles
- Ces séquences d'actions sont représentées par **Grafcet** ou **Réseaux de Pétri** et sont programmées à l'aide de langage de haut niveau dans des **automates programmables** et sans intervention humaine
 - Feux de croisement, chaîne d'assemblage, radar automatique, ...



Automatique ou Automatisme ?

- Il faut distinguer deux domaines d'intervention de l'Automatique :
 - Automatique pour les systèmes à événements discrets=Automatisme*
 - Leurs variables ne peuvent prendre que deux états : marche/arrêt
 - Automatique pour les systèmes continus**
 - Leurs variables peuvent prendre des valeurs réelles quelconques
 - Température, débit, pression, position, vitesse ...
 - Leur commande** a pour but de réguler ou d'asservir des grandeurs physiques de façon précise et sans intervention humaine



***Dans ce cours, nous ne nous intéresserons qu'à
l'Automatique des systèmes continus***

L'Automatique est... *... omniprésente dans notre quotidien !*

- Exemples
 - Régulation de température
 - de l'eau de la douche
 - Régulateur de vitesse d'une voiture



- Régulations naturelles assurées par le corps humain :
 - température, glycémie, pression artérielle, fréquence cardiaque, oxygénation sanguine pendant l'effort physique,...

L'Automatique dans le secteur aérospatial

Y-a-t-il (encore) des astronautes aux commandes ?

Lanceur Ariane 5 - Décollage



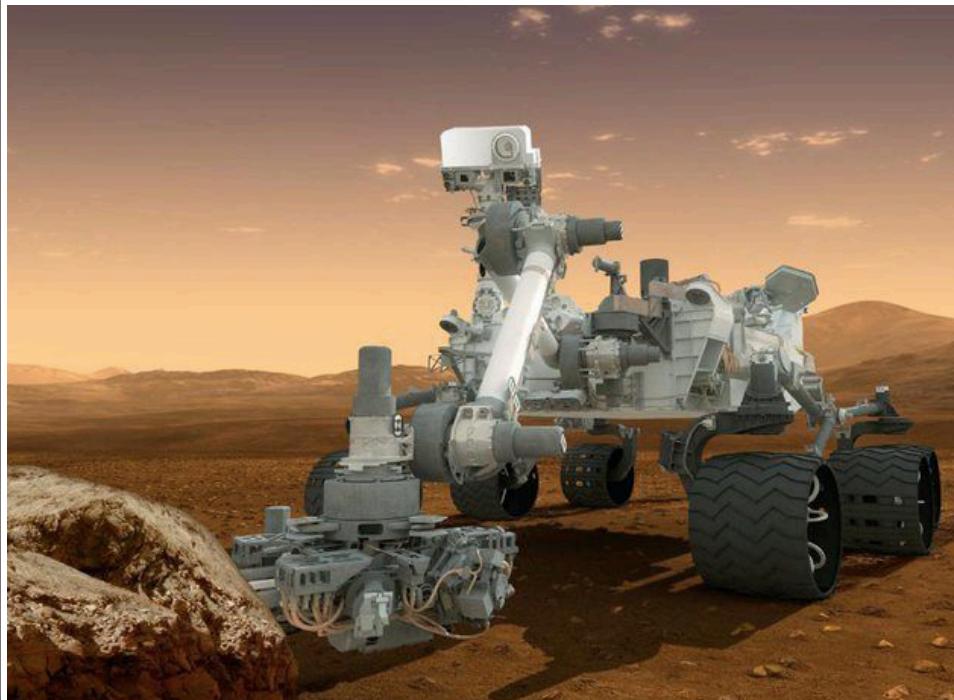
SpaceX Falcon 9 - Atterrissage



www.youtube.com/watch?v=oa_mtakPlfw

L'Automatique dans le secteur aérospatial

Curiosity sur Mars - août 2012



Satellite de télécommunications



L'Automatique dans le secteur aéronautique

Y-a-t-il (encore) un pilote dans l'avion ?



- Airbus A380
 - Le plus gros avion du monde
 - « Monstre » de 420 tonnes
- Falcon 7x

L'Automatique dans le secteur de la robotique

Des drones à tout faire ?



www.youtube.com/watch?v=NRL_1ozDQCA



raffaello.name/projects/flight-assembled-architecture/

L'Automatique dans les terminaux portuaires



- <https://www.youtube.com/watch?v=wiKS-RYf-cY&t=1s>

L'Automatique dans le secteur automobile

- Derrière chaque acronyme se cache un peu d'automatique
 - *ABS : Anti-lock Braking System*
 - *ESC : Electronic Stability Control*
 - *ACE : Active Cornering Enhancement*
 - *TCS : Traction Control System*
 - *ACC : Adaptive Cruise Control*
 - *ANC : Active Noise Control*



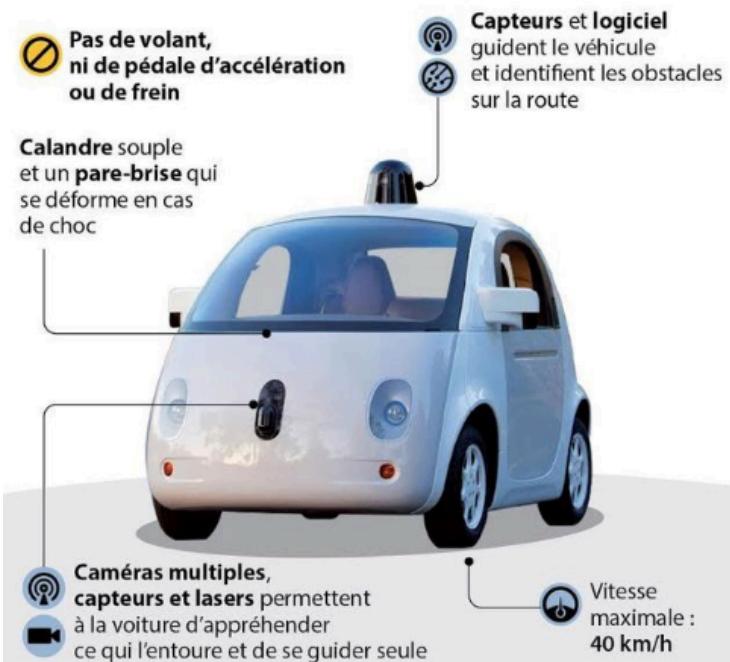
- Ils permettent une conduite plus sûre et plus économique

L'Automatique dans le secteur automobile

- Devrait permettre, dans un futur proche :
 - de concevoir des véhicules autonomes sans conducteur
 - circulant en flotte

La «Google Car»

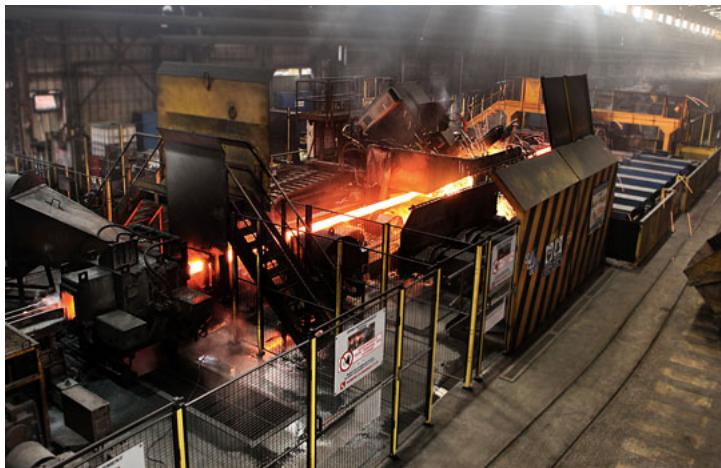
Un prototype de voiture deux places sans conducteur



L'Automatique dans le secteur de l'énergie



L'Automatique dans le secteur de l'industrie



L'Automatique dans le secteur de l'agriculture

Système automatique d'irrigation des cultures

*Commande manuelle
des vannes*



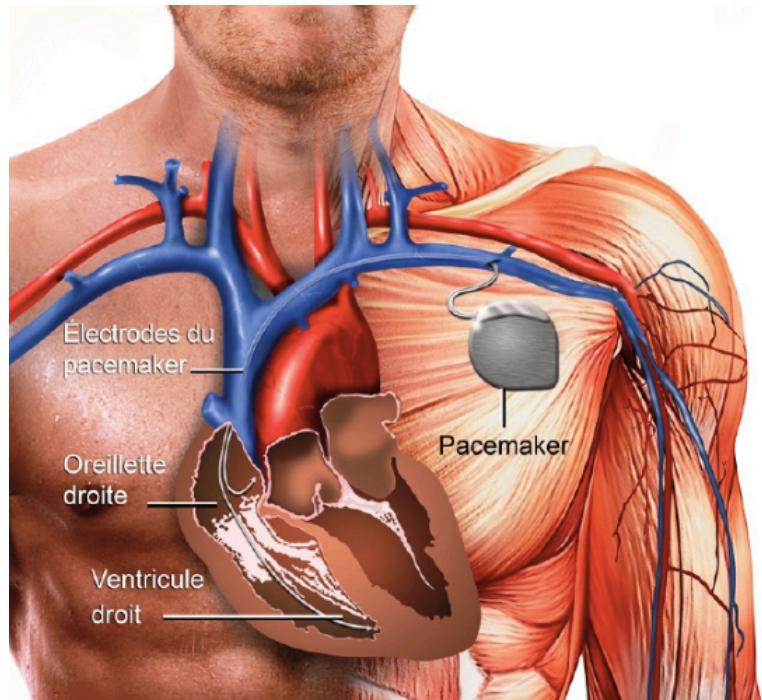
Commande automatique



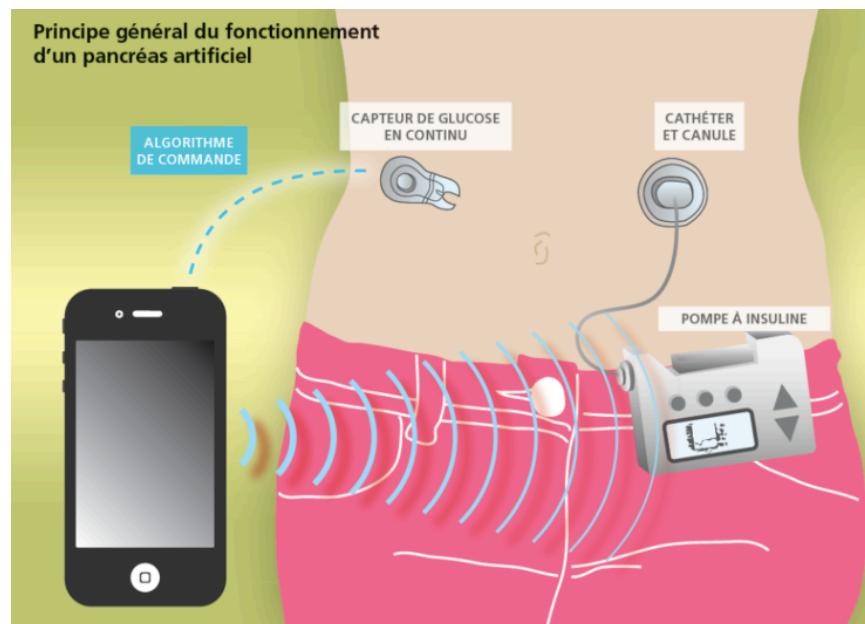
L'Automatique dans le secteur de la santé

- Compense les défaillances de certains organes du corps humain

Pacemaker



Le pancréas artificiel



<http://www.youtube.com/watch?v=XUyteJvtMuY>

L'Automatique est au cœur de tout !

- Transports : automobile, aéronautique, aérospatiale, navale, portuaire et ferroviaire
- Industries chimique, pharmaceutique, sidérurgique, papetière, agroalimentaire
- Robotique, mécanique
- Systèmes de télécommunications
- Énergies hydraulique, éolienne, solaire, nucléaire
- Agriculture
- Santé (*biologie et médecine*)
- Economie et finance,...

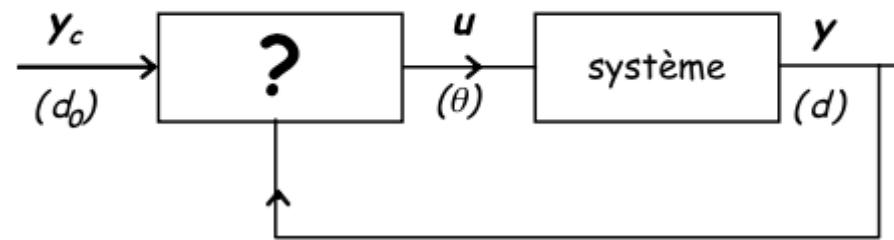
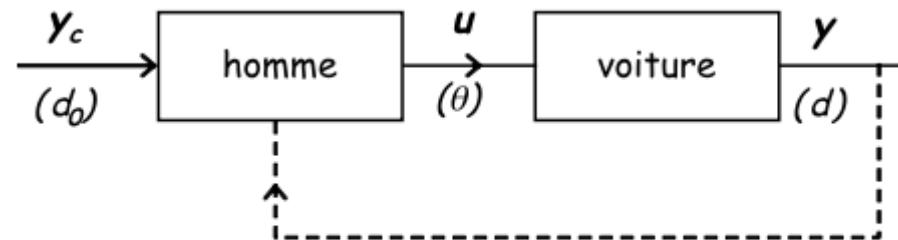
T. Samad, A.M. Annaswamy (Eds.). The Impact of Control Technology, Overview, Success Stories, and Research Challenges, 2011. www.ieeecss.org



Visionner la vidéo de Brian Douglas : *Why learn control theory*
https://www.youtube.com/watch?v=oBc_BHxw78s&t=10s

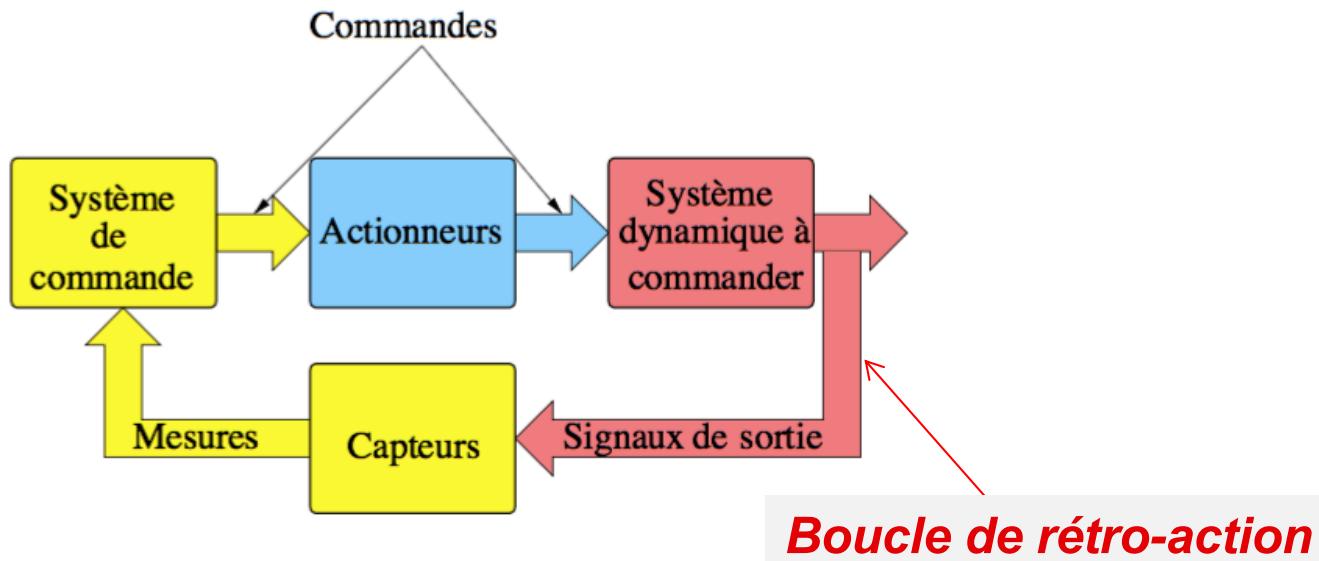
Finalité de l'Automatique

- La finalité de l'Automatique est de **remplacer l'homme** ou de suppléer à ses limites pour la commande d'un système



Principe fondamental de l'Automatique : *la boucle fermée ou rétro-action*

- Le principe de base consiste à mesurer le signal de sortie pour ajuster le signal de commande : **rétro-action (feedback)**



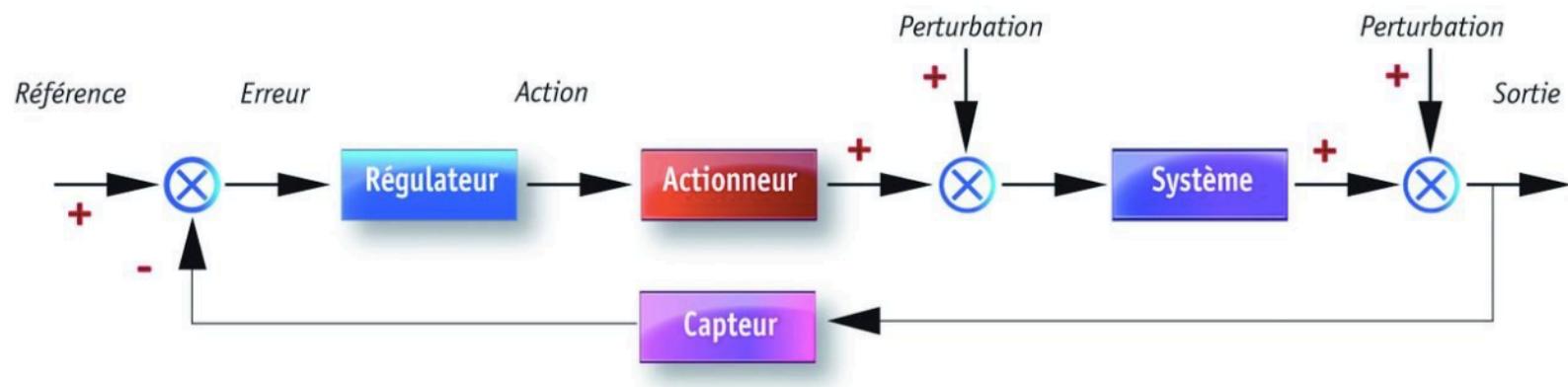
- La commande en **boucle fermée** reproduit donc le comportement humain normal

Observation → réflexion → action

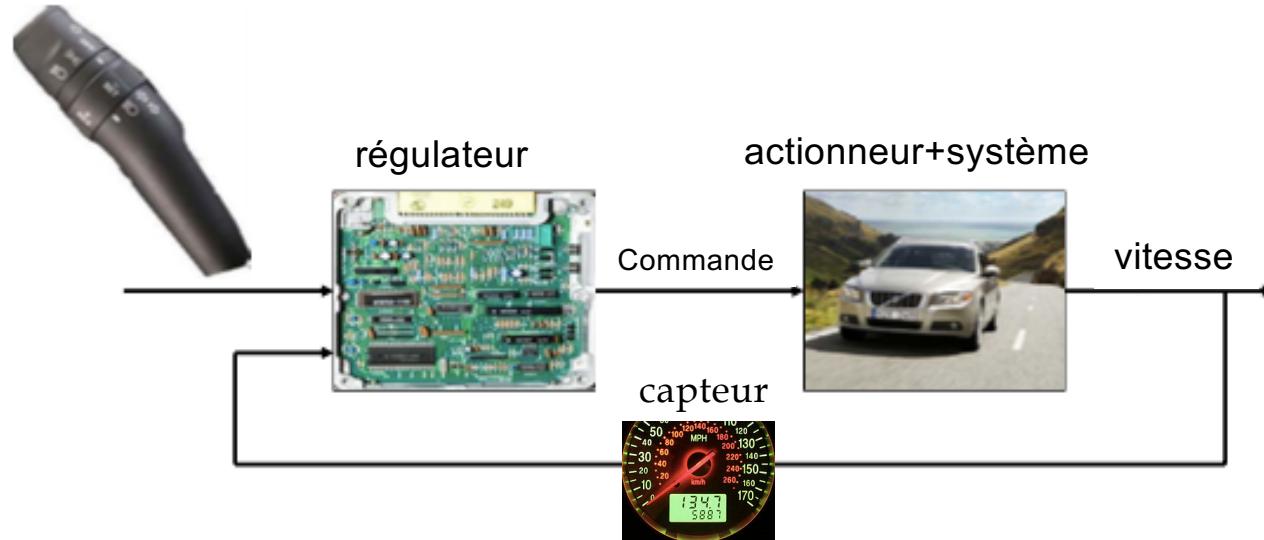
Les trois éléments fondamentaux d'une commande (*automatique*) en boucle fermée

www.youtube.com/watch?v=XJLMW6I303g

- ① **Capteur**
- ② **Régulateur**
- ③ **Actionneur**



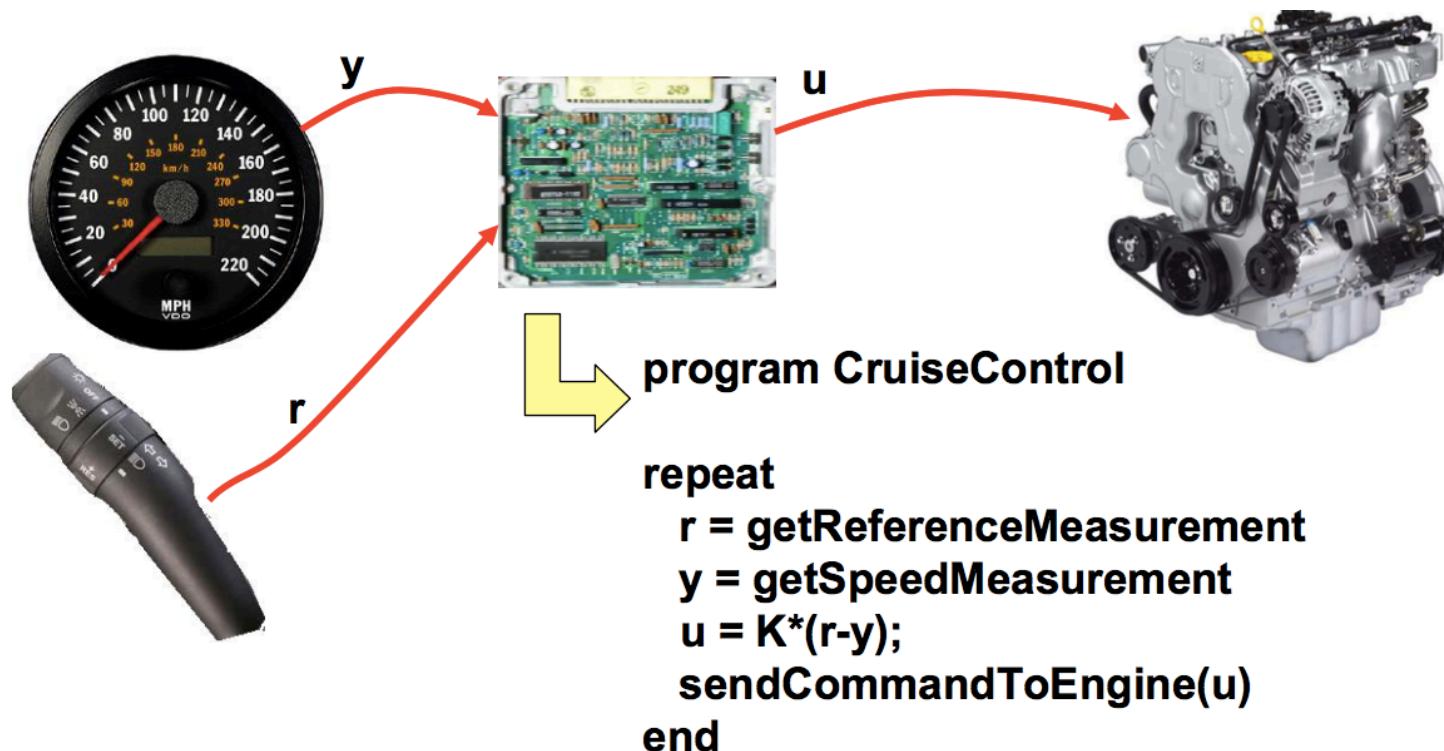
Exemple : régulateur de vitesse d'une voiture



1. On définit la vitesse désirée (objectifs)
 - On veut rouler à 110 km/h
2. On mesure la vitesse à l'aide d'un **capteur**
 - On roule à 100km/h (*par exemple*)
3. Le **régulateur** détermine l'action à effectuer
4. La nouvelle commande est appliquée via **l'actionneur**

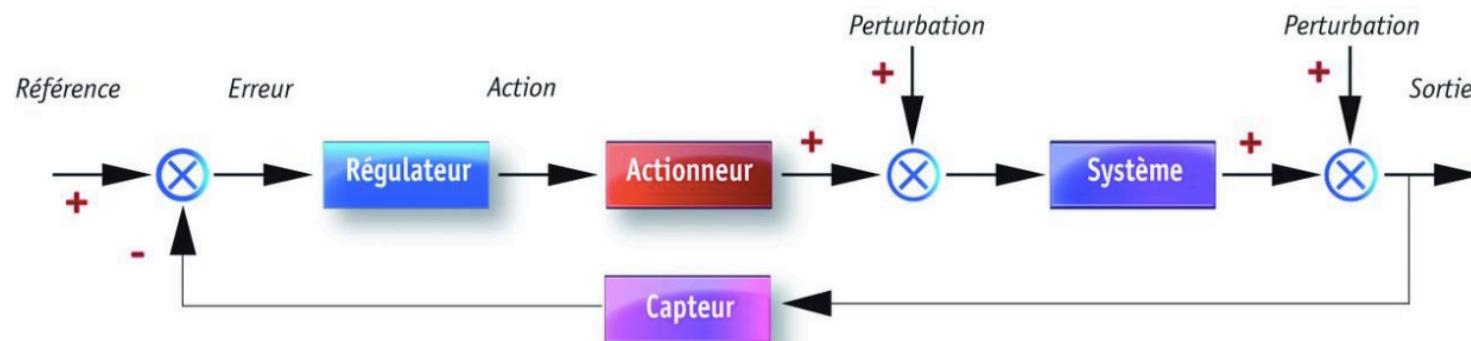
Concrètement, c'est quoi un régulateur de vitesse ?

- C'est un programme exécuté par l'ordinateur de bord, qui d'après la vitesse désirée et mesurée, détermine la commande à envoyer au moteur



Asservissement ou régulation ?

- On distingue deux types de problèmes en Automatique continue :
 - **Asservissement** : poursuite/suivi par la sortie d'une **référence ou consigne variable** au cours du temps
 - Asservissement de position : bras de robot, ascenseur, poursuite d'une trajectoire lors du lancement d'une fusée, ...
 - **Régulation** : rejet de l'effet de **perturbations variables** sur la sortie autour d'un point de **référence ou consigne fixe** au cours du temps
 - Régulation de vitesse, de température...

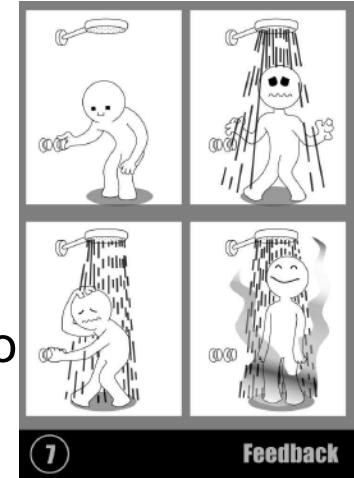


Avantages/inconvénients d'une commande automatique

- Avantages
 - **Suivi** d'une consigne/référence variable (*sans brutaliser les actionneurs*)
 - Rejet/suppression des **perturbations** externes
 - **Stabilisation** d'un système instable en boucle ouverte
 - Amélioration du temps de réaction du système
- Inconvénients
 - Problème de **saturation** de la commande
 - Bruit de mesure
 - Perte possible de la stabilité du système bouclé

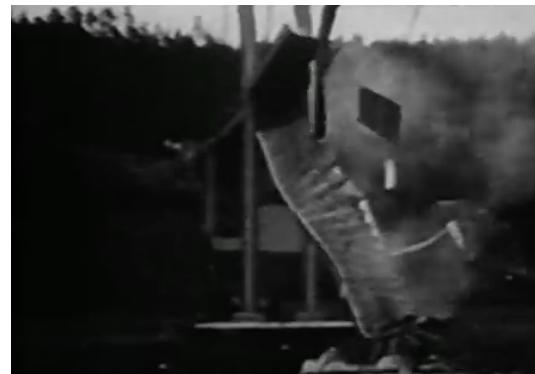
Effets d'une perte de contrôle/stabilité d'un système

- Effets déplaisants sans conséquence majeure
 - Chute en vélo (*à faible vitesse !*)
 - Variation de la température de l'eau sous la douche
 - Effet Larsen - Retour acoustique désagréable d'un micro
- Effets tragiques
 - Destruction du pont de Tacoma, black-out (*panne électrique à grande échelle*)



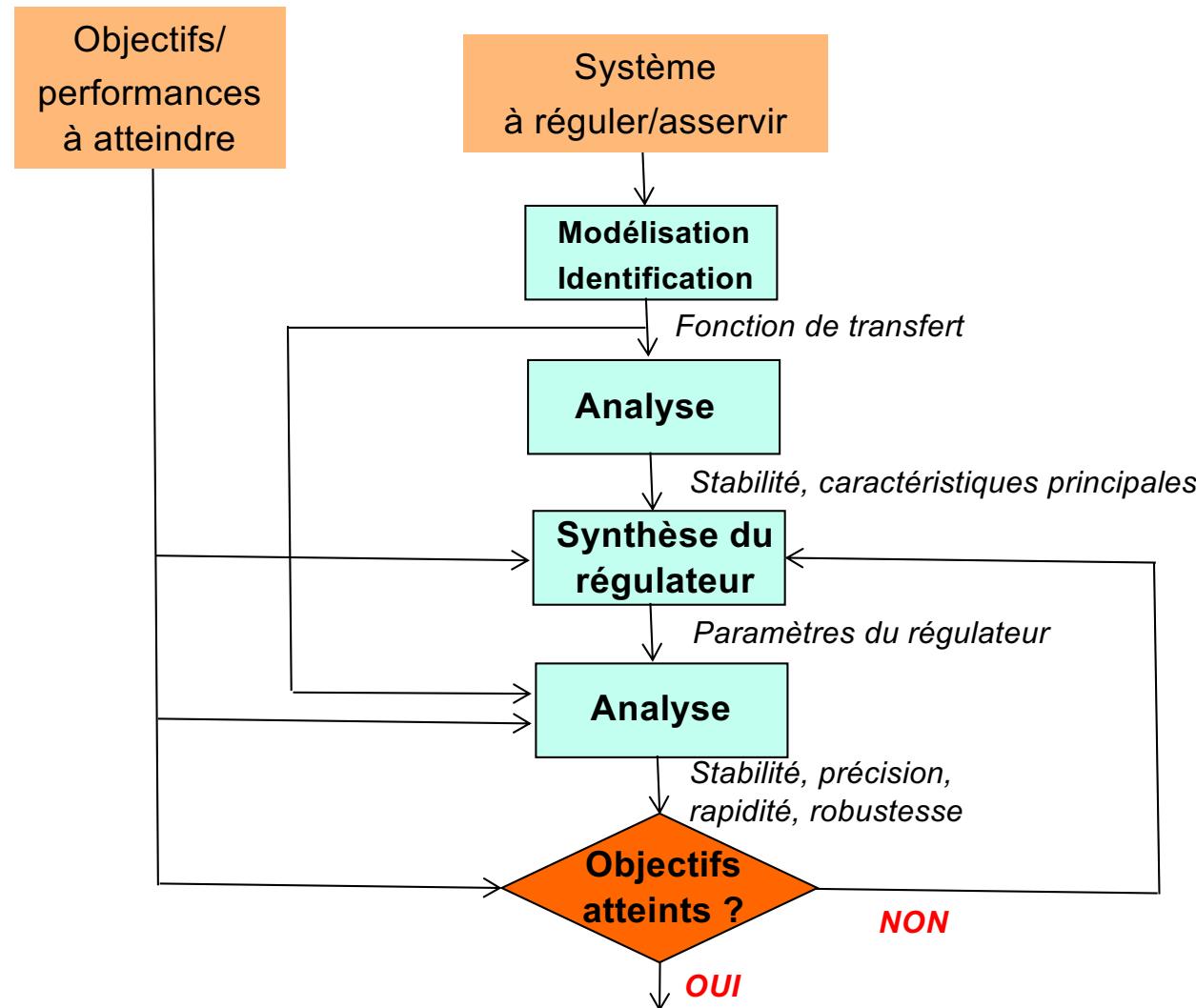
7

Feedback



<https://www.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs>

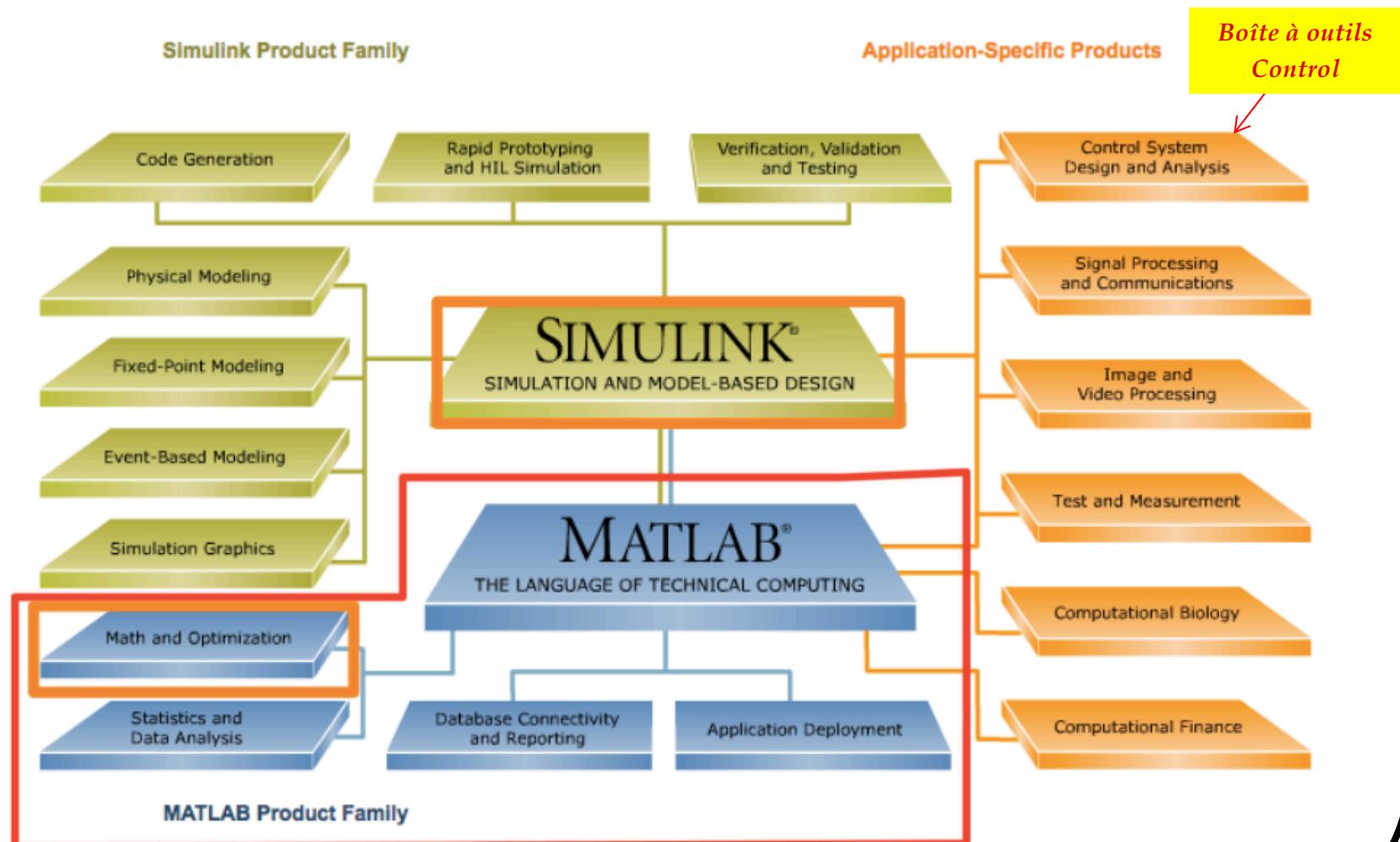
Les étapes de conception d'une commande en boucle fermée



Ce que nous allons apprendre dans ce cours

- Comment décrire/modéliser un système à commander
- Comment analyser un système à commander
- Comment concevoir un régulateur standard de type PID
- Comment analyser un système bouclé

Exploitation de Matlab pour faciliter l'analyse



www.matlabexpo.com/fr/

Plan du cours

- ① Introduction à l'Automatique et modélisation mathématique
- ② Analyse des systèmes
- ③ Stabilité des systèmes
- ④ Systèmes bouclés : commande, stabilité et performances
- ⑤ Correcteurs PID standards et leurs réglages

Vos objectifs à l'issue du cours

- Maîtrise du vocabulaire spécifique à l'Automatique continue
- Maîtrise des principales notions liées à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques
 - Modélisation pour l'Automatique
 - Stabilité des systèmes dynamiques
- Maîtrise des outils mathématiques associés
 - Outils graphiques : réponses temporelles
 - Outil algébrique : critère de Routh-Hurwitz
- Maîtrise de la synthèse de correcteurs de type PID