



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



POLYTECH[®]
NANCY

Automatique continue

Control Engineering

Hugues GARNIER

hugues.garnier@univ-lorraine.fr

Version du 10 octobre 2020

Volumes horaires

- **Automatique continue**
 - 5 séances de cours (*de 2h*) 10h
 - 6 séances de TD (*de 2h*) – énoncés en anglais 12h
 - 3 séances de TP (*de 4h*) **New** - énoncés en anglais 12h

- Intervenant en cours (*distanciel*)
 - H. Garnier

Intervenants en TD (*hybride*)

- H. Garnier
- F. Collin

Correction des TD disponibles en fin d'énoncé

- Intervenants en TP (*présentiel*)

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

Contrôle des connaissances

- 2 devoirs surveillés
 - partiel (2 nov 17h) : 1h00 – *énoncé en anglais*
 - final : 2h00 – *énoncé en anglais*
- Compte-rendu (CR) de TP – *énoncé en anglais*
 - A faire en binôme
- Calcul de la note finale

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



Avertissement & Conseil

- ***Avertissement***

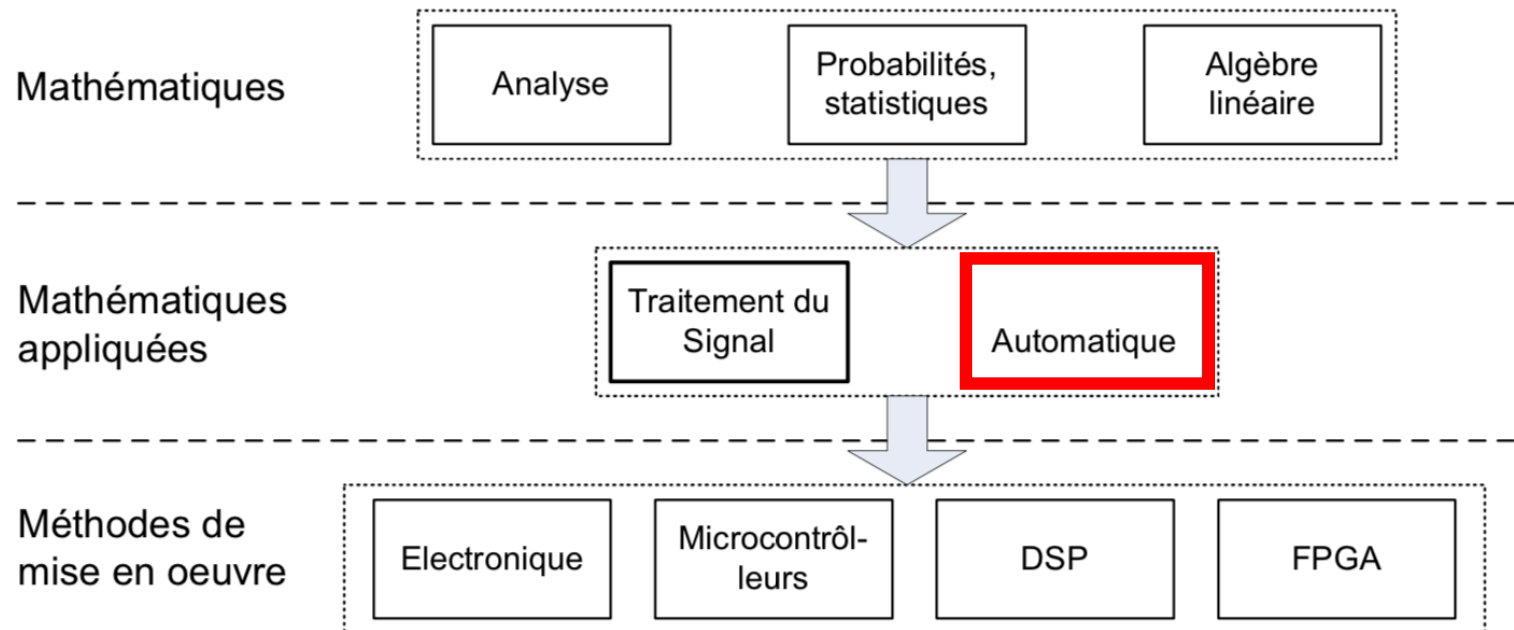
- Au risque d'être très vite dépassé, vous devez :
 - relire systématiquement vos notes personnelles et les transparents du cours précédent
 - apprendre les définitions
 - connaître les formules importantes
 - refaire les exercices vus en cours et en TD

- ***Conseil***

- vous constituer un résumé personnel au fur et à mesure des séances de cours

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

Prérequis

- Fonctions usuelles : exponentielle,...
- Décomposition en éléments simples
- Transformée de Laplace
- Résolution d'équations différentielles par transformée de Laplace

Voir le rappel sur Transformée de Laplace et décomposition en éléments simples sur le site de cours

Ouvrages de référence & sites web

- Site web pour le cours : *support de cours, énoncés de TD/TP*
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. Aström, R. Murray, *Feedback Systems. An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2009

Version pdf de l'ouvrage disponible

http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09.pdf

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. Boursès. *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

Autre source recommandée pour le cours : *La chaîne youtube de Brian Douglas*

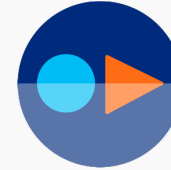
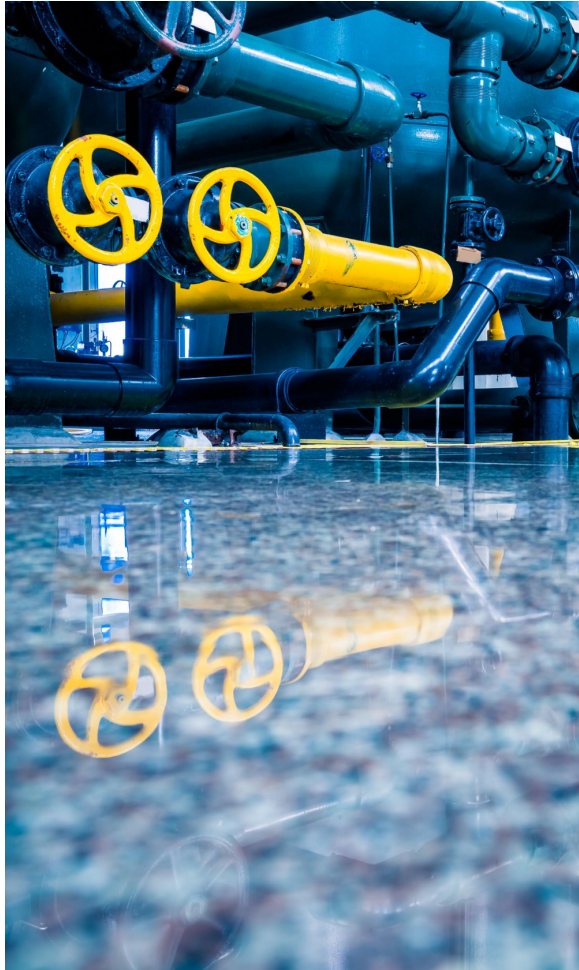
- <https://www.youtube.com/user/ControlLectures/>

The screenshot shows the YouTube channel page for Brian Douglas. At the top, there's a search bar with the text 'Rechercher' and a magnifying glass icon. Below the search bar is a banner image with the text 'Control System Lectures' in white on a black background. The banner also contains various technical diagrams and text related to control systems, such as 'Feed water into tank', 'Excess water flows out', 'The input force is an impulse', 'Initial Velocity', 'Impulse Response', and 'the convolut'. Below the banner is the channel name 'Brian Douglas' with a profile picture and '205 k abonnés'. To the right of the name is a red 'S'ABONNER' button. Below the channel name are navigation tabs: ACCUEIL, VIDÉOS, PLAYLISTS, COMMUNAUTÉ, CHAÎNES, À PROPOS, and a search icon. The main content area shows a video player with the title 'Where have I been?' and a description that includes links to a Redbubble shop and an engineering media website. The video player shows a progress bar at 0:01 / 2:30.

Les vidéos à regarder seront signalées par ce
symbole dans les transparents



Autre source recommandée pour le cours : Le cours sur application mobile de *Quanser*



Experience Controls by Quanser

Experience Controls is a free mobile textbook designed to give you real design intuition and relevant skills in a hands-on way in the control systems engineering space.

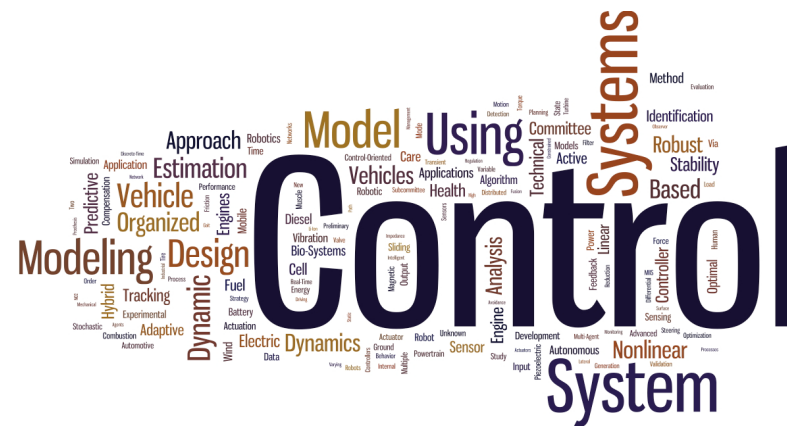
The textbook app includes:

- 50+ lesson modules covering introductory to advanced concepts
- Interactive simulations of industrial-level controls problems
- Mini-lecture podcasts that summarize key takeaways for each chapter, available in-app or in your preferred podcast player
- End-of-chapter review questions to check your understanding



Définition - Automatique

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



- recherche 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 Automatismes ?

- 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 **Grafct** 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 Automatismes ?

- Il faut distinguer deux domaines d'intervention de l'Automatique :
 - *Automatique pour les systèmes à événements discrets=Automatismes*
 - *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



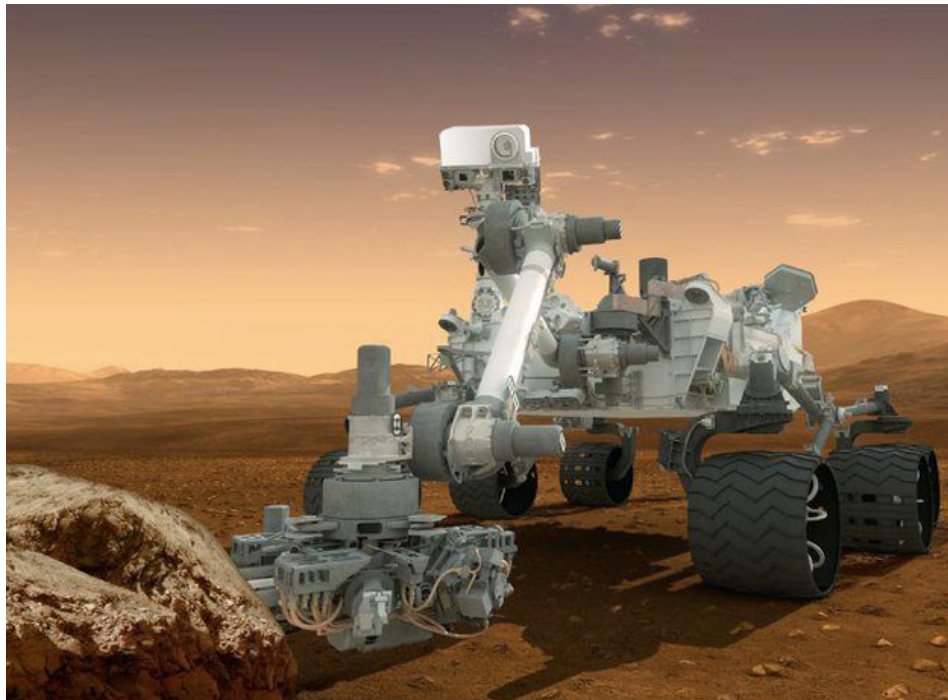
SpaceX Falcon 9 - Atterrissage



www.youtube.com/watch?v=oa_mtakPIfw

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*



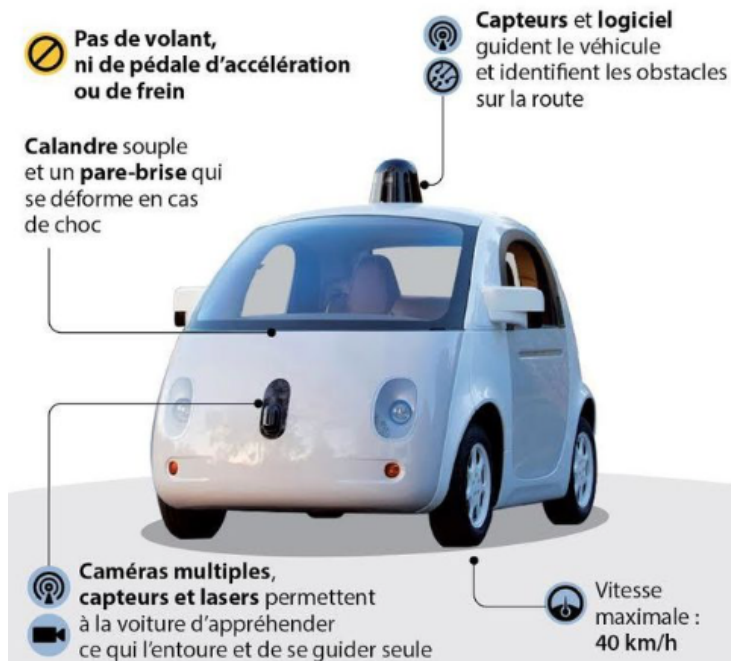
– Ils permettent une conduite plus sûre et plus économe

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»

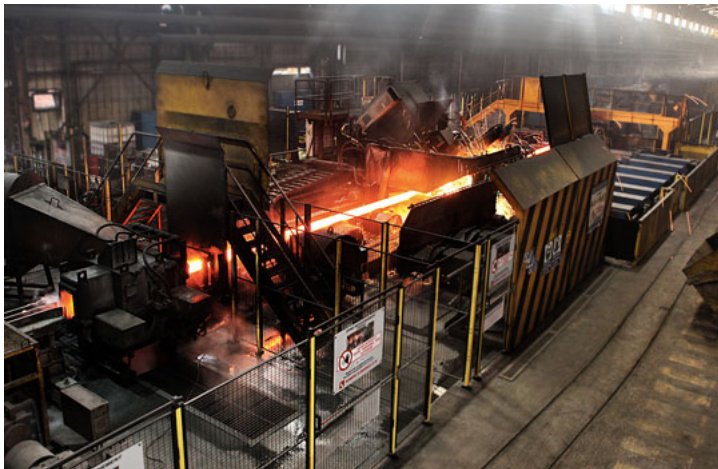
Un prototype de voiture deux places sans conducteur



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



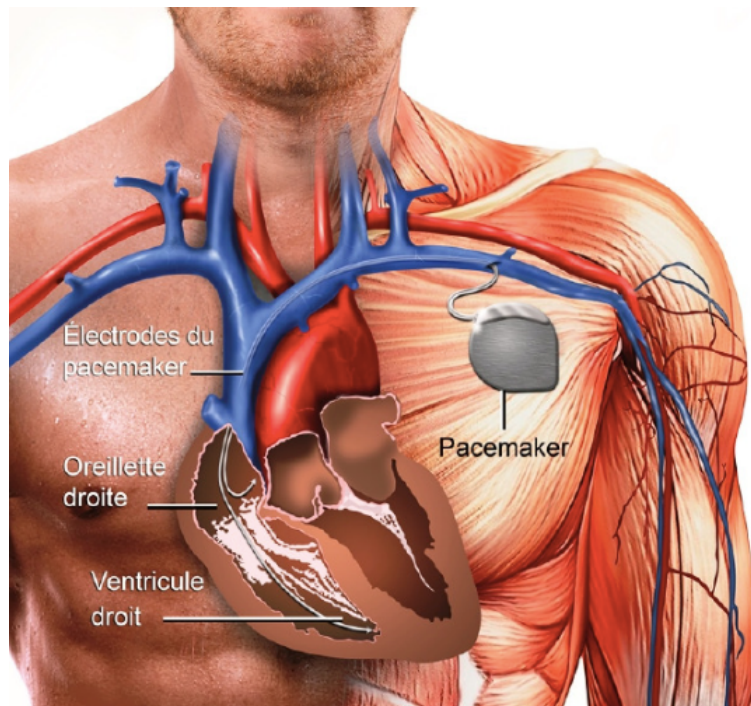
Commande automatique



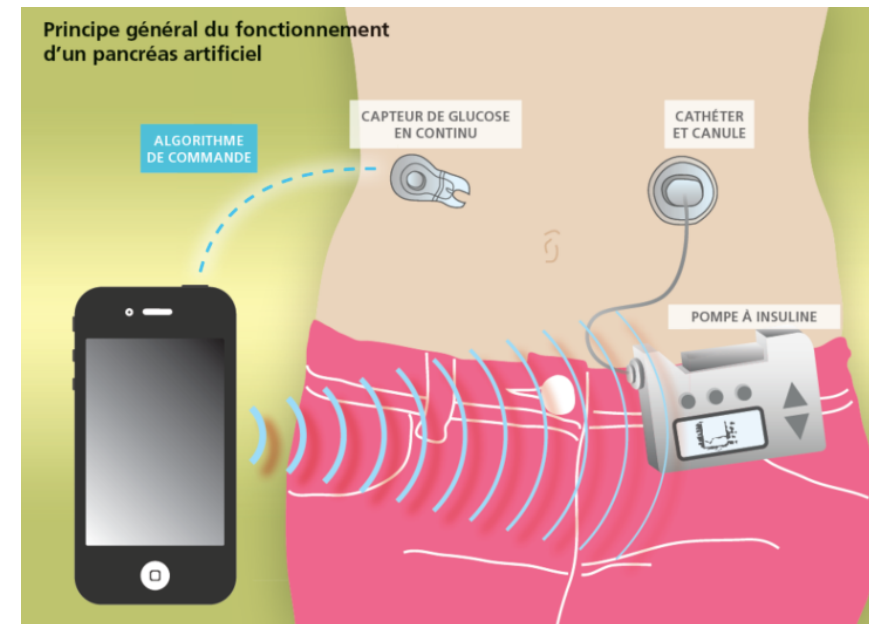
L'Automatique dans le secteur de la santé

- 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

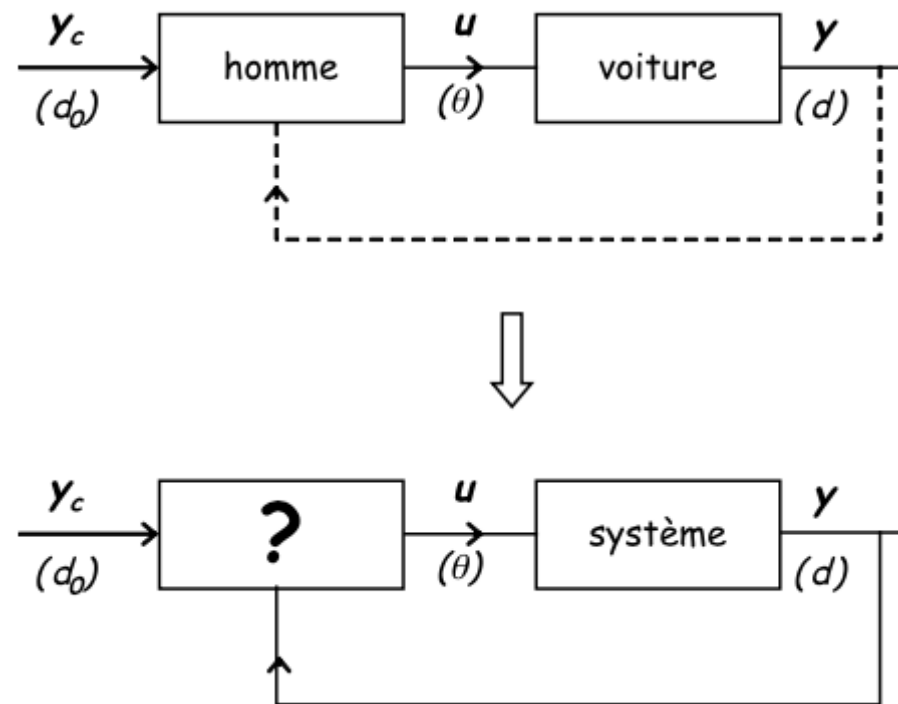


Visionner la vidéo de Brian Douglas : *Why learn control theory*

https://www.youtube.com/watch?v=oBc_BHxw78s&t=10s

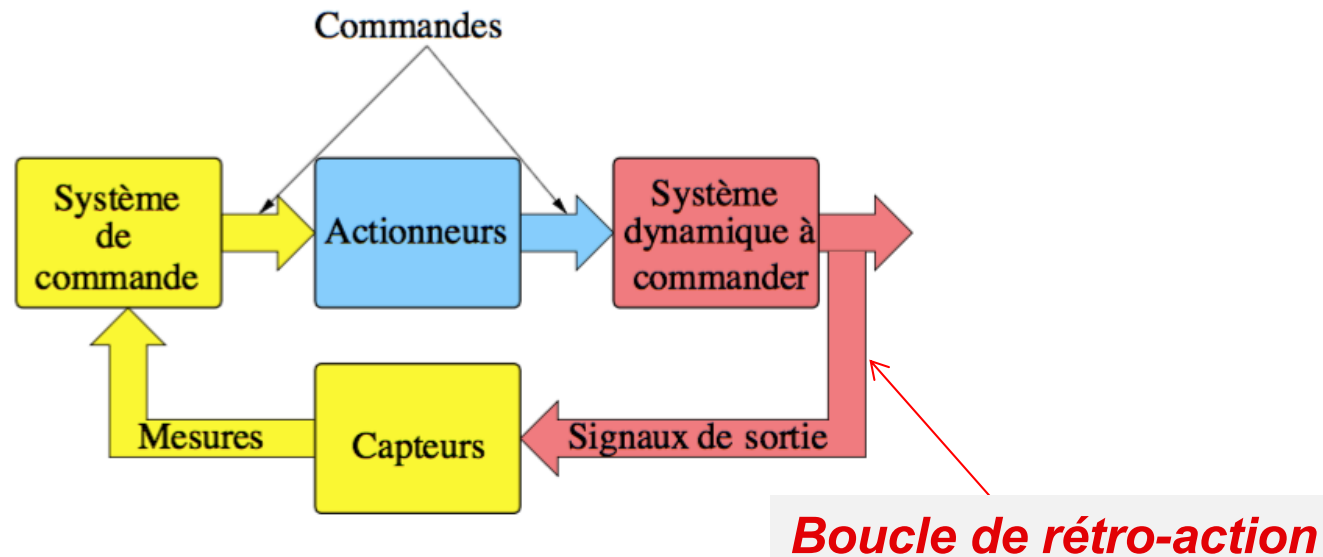
Finalité de l'Automatique

- 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

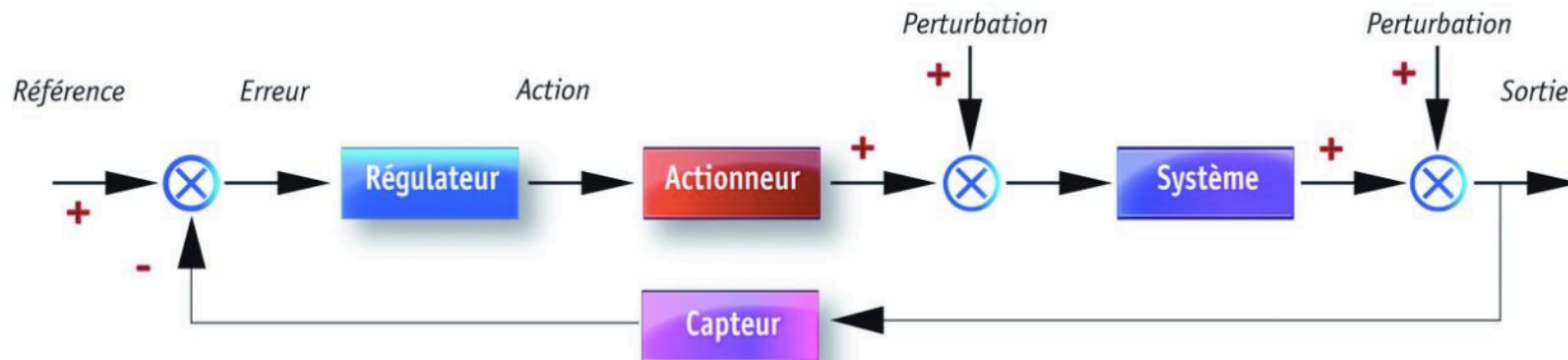
Observation → réflexion → action

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

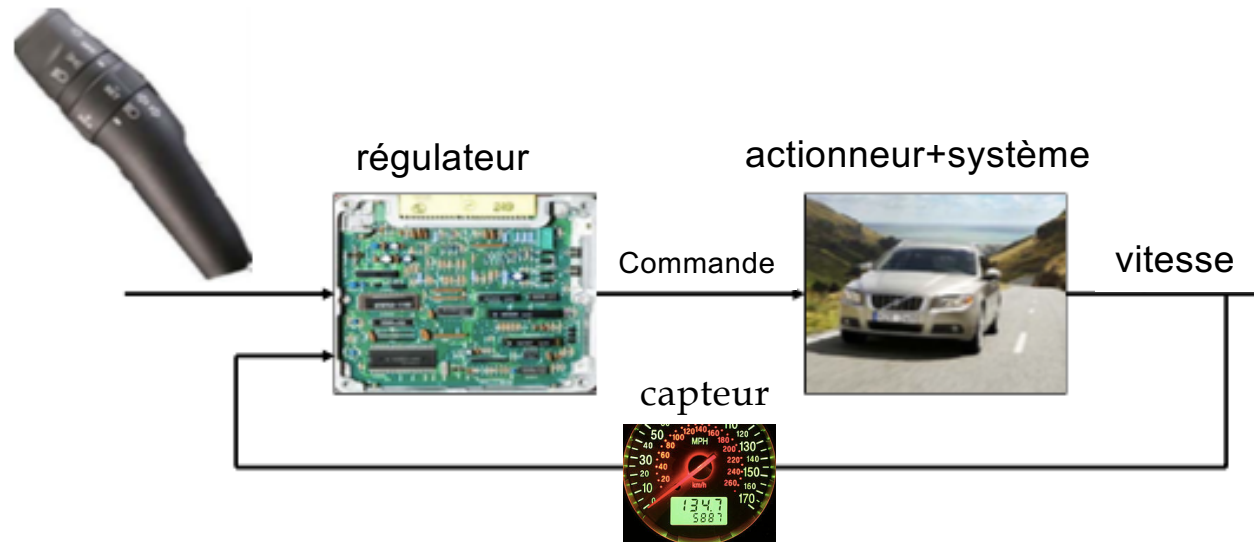


www.youtube.com/watch?v=XJLMW6I303g

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



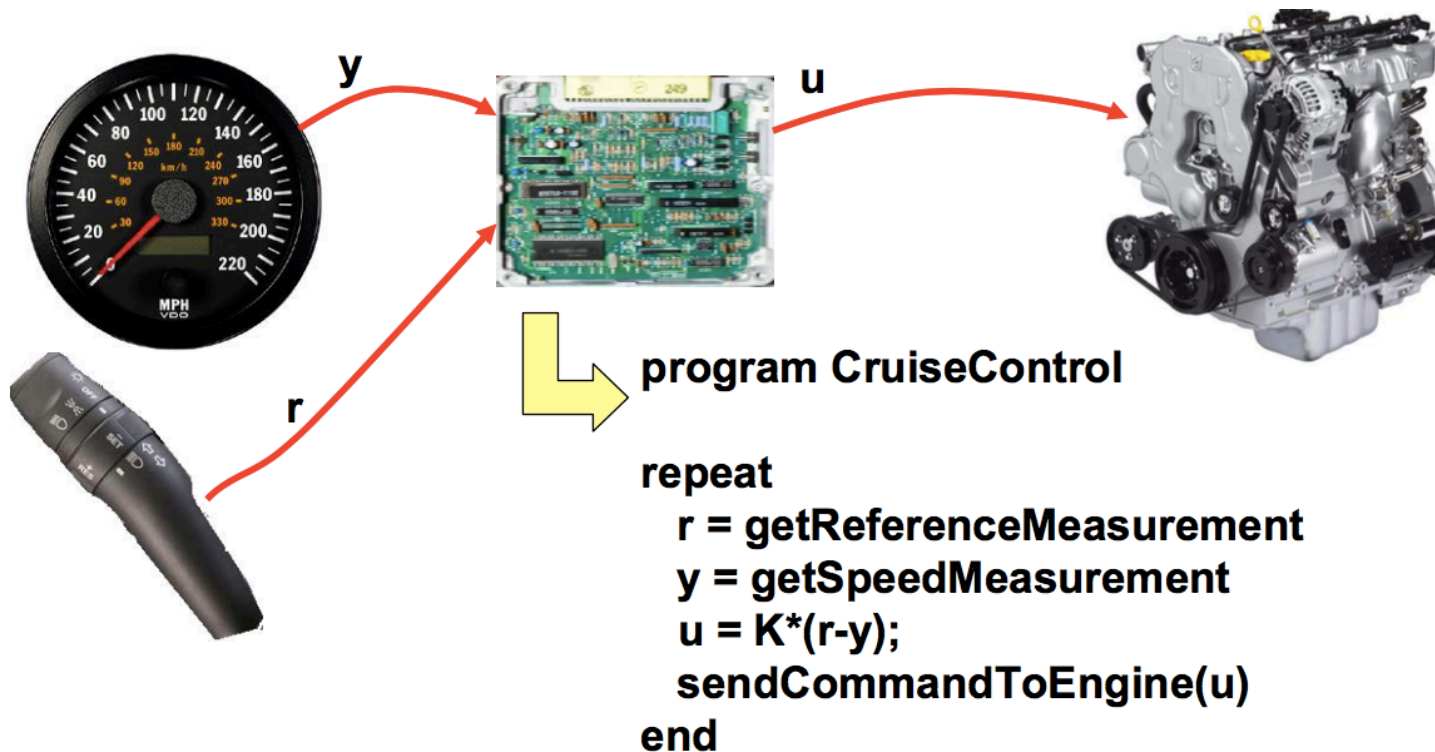
Exemple : régulateur de vitesse d'une voiture



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**

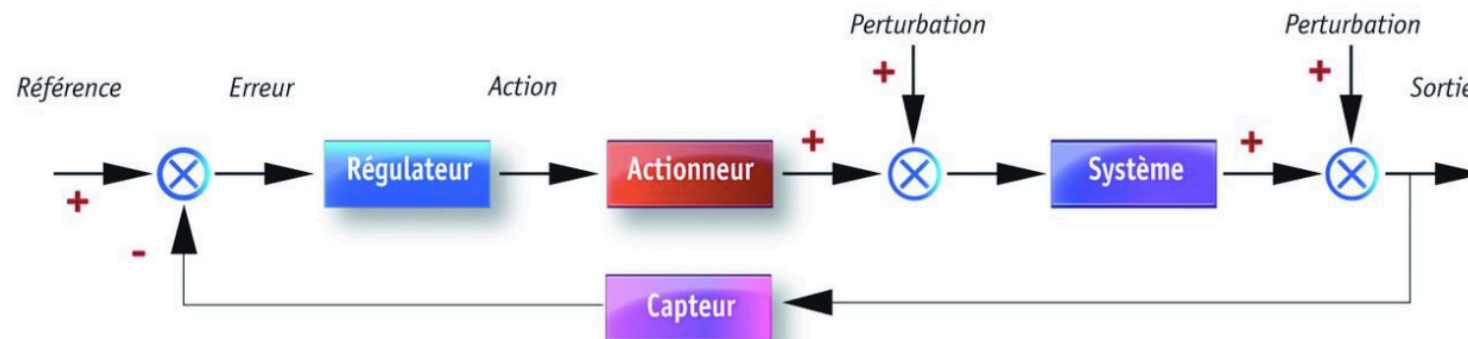
Concrètement, c'est quoi un régulateur de vitesse ?

- 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...

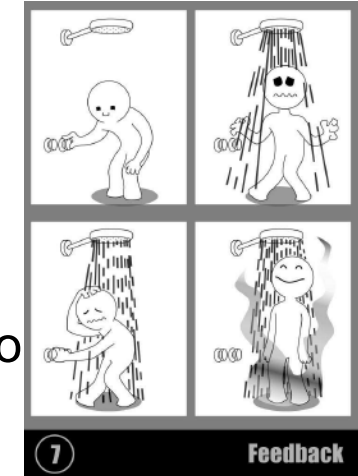


Avantages/inconvénients d'une commande automatique

- 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

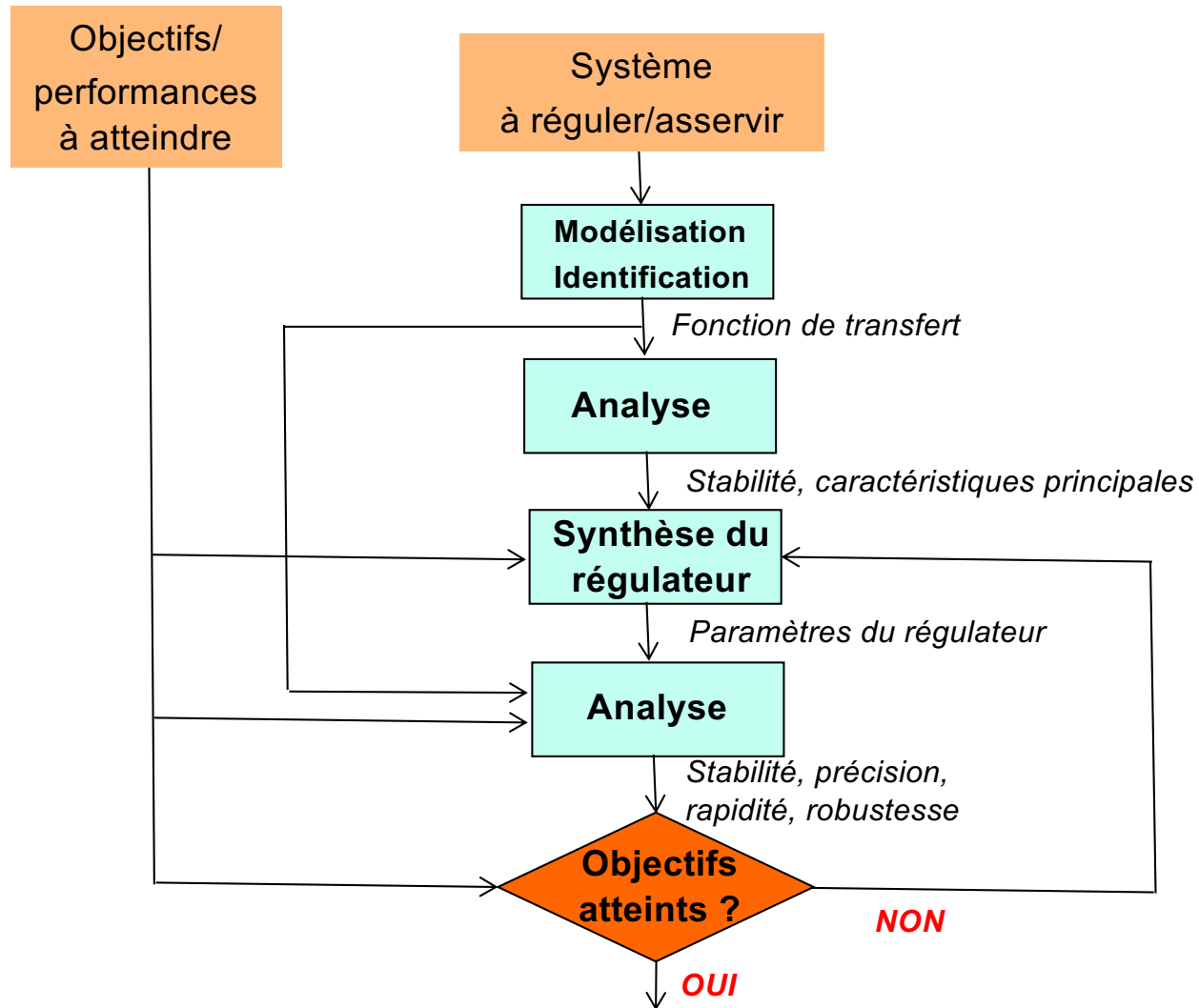
Effets d'une perte de contrôle/stabilité d'un système

- 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*)

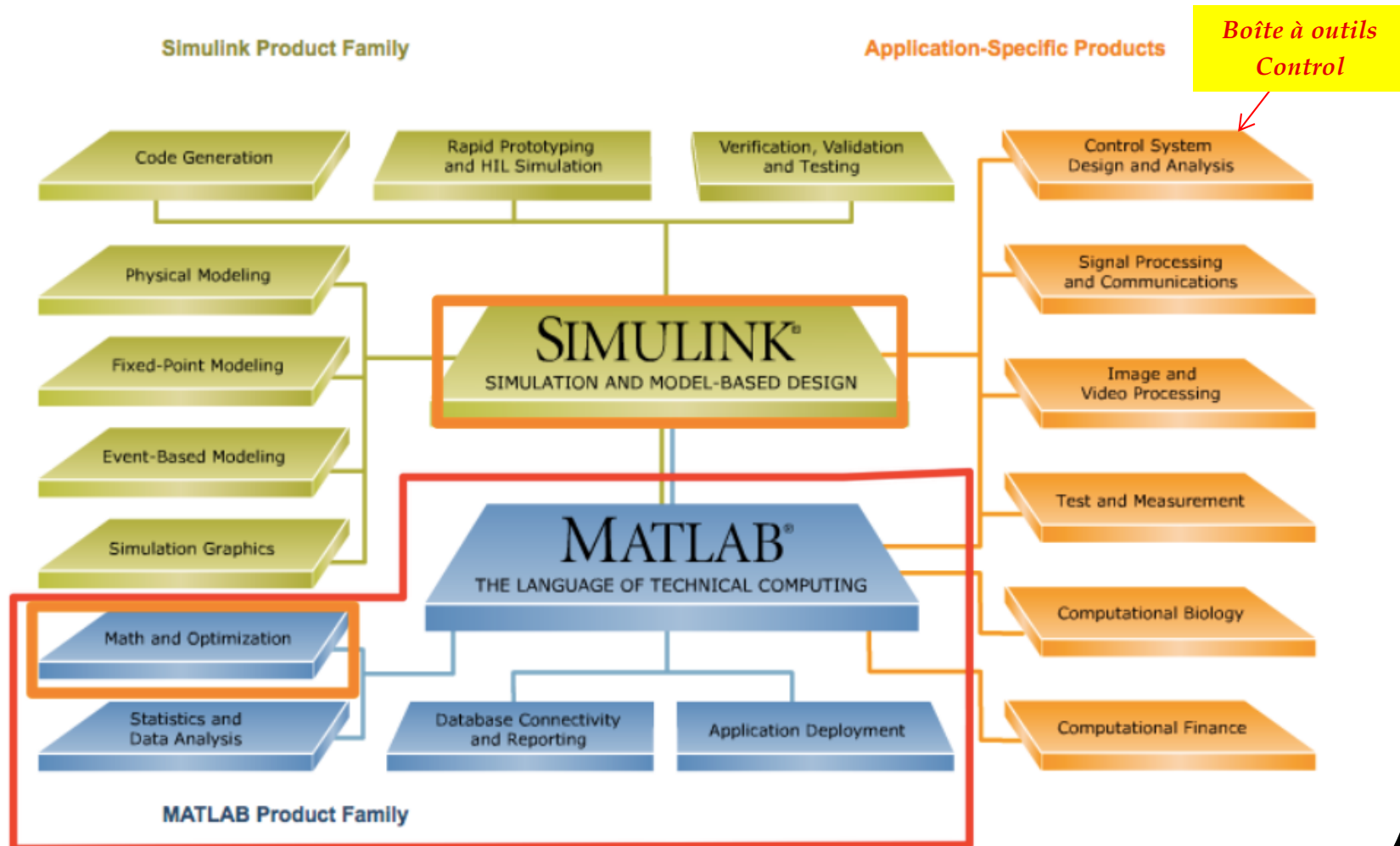


<https://www.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs>

Les étapes de conception d'une commande en boucle fermée



Exploitation de Matlab pour faciliter l'analyse



www.matlabexpo.com/fr/

Ce que nous allons apprendre dans ce cours d'introduction à *l'automatique dite classique*

- 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



- **Visionner la vidéo de Brian Douglas : « *Control Systems in Practice, Part 1: What Control Systems Engineers Do* »**

<https://www.youtube.com/watch?v=ApMz1-MK9IQ>

La ligne du temps en Automatique

Préhistorique

Primitive

Classique

Moderne

1868

1910

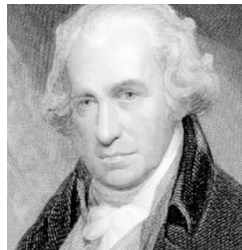
Premier ordinateur

Fin 40

1960

Programme spatial

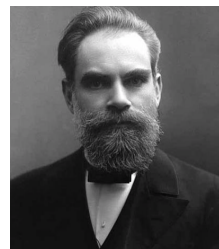
- Régulation numérique
- Modèle d'état, ...



James **Watt**
1736-1819



James **Maxwell**
1831-1879



Alexandre **Lyapounov**
1857-1918



Hary **Nyquist**
1889-1976



Harold **Black**
1898-1983



Henrik **Bode**
1905-1982



Rudolf **Kalman**
1930-2016

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 enseignées aujourd'hui, notamment les diagrammes de **Nyquist** et de **Bode**

Des offres d'emplois nombreuses et diverses en Automatique *même chez Apple !*

jobs.ieee.org/jobs/controls-design-engineer-cupertino-ca-95014-118955872-d

Posted: Aug 12, 2020


Apple's Special Projects Group is seeking a full-time engineer to join our Controls Engineering group in Cupertino, CA.

Candidate will be responsible for development of control and estimation algorithms for complex electromechanical systems.

Key Qualifications

- Deep knowledge of systems theory and control systems design.
- Deep understanding of classical and modern control methodologies: PID, optimal control (LQR, LQG), model-predictive control, etc.
- Deep understanding of state estimation techniques: state observers, Kalman filter, nonlinear state estimation.
- Experience with LPV systems, optimization, moving horizon estimation, system identification, and adaptive control preferred.
- Experience implementing control systems on embedded microcontroller platforms.
- Proficiency in MathWorks tools: MATLAB/Simulink is a must.
- Proficiency in C/C++ is a must. Python preferred.
- Proficiency in modern software development workflows and practices.
- Excellent collaborative skills.
- Capable of working in a loosely structured organization.
- Highly professional, with the ability to deliver solid work on tight schedule.

*Programme
du parcours
SIA d'IS*



Description

We are seeking a highly motivated controls design engineer to lead the development of control and estimation algorithms for complex dynamical systems.

Collaborate in highly cross-functional environment and work closely with sensor and actuator design engineers, software engineers, and other control design engineers.

Lead control projects from algorithm architecture to design, implementation, tuning, and validation.

Define specifications and test suites to tune parameters and compare performance of different algorithms.

Work with software team to ensure robust control system implementation on embedded microcontrollers.

Work with modeling team to integrate models and algorithms into simulation environment for rapid development and validation.

Education & Experience

MS or PhD degree in Electrical Engineering, Mechanical Engineering, Aerospace Engineering, or Mechatronics Engineering, with an emphasis in controls or robotics.

Plan du cours

- ① Introduction à l'Automatique et modélisation des systèmes
- 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
 - **Modèles des systèmes**
 - **Réponse temporelle de systèmes**
 - **Stabilité des systèmes**
- Maîtrise des outils mathématiques associés
 - **Transformée de Laplace**
 - **Critère de Routh-Hurwitz**
- Maîtrise de la synthèse de correcteurs standards
 - **de type PID**