

# Systèmes asservis, régulateur de vitesse, performances et stabilité

Charlotte JOUVE

Tuteur : Jean-François BALMAT

L2 SI 2024-2025

Laboratoire : LIS

# Problème : Comment régule-t-on automatiquement la vitesse d'un système type véhicule ?

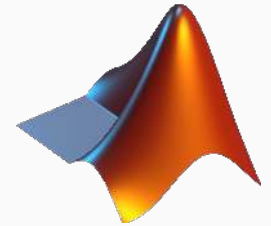
## Contexte - objectifs

- Modéliser un système dynamique (linéaire) d'un véhicule.
- Étudier sa réponse en boucle ouverte (non contrôlée)
- Concevoir et régler un **Régulateur PI** pour améliorer les performances

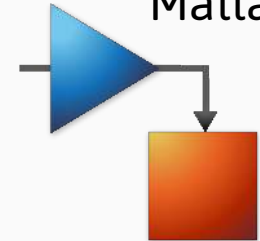
## Axes

- Introduction - Modélisation du système, étude en boucle ouverte
- Implémenter un régulateur **PI** (méthode **empirique**)
- Régler le PI avec la méthode de **Ziegler-Nichols**
- Synthèse des résultats - Conclusion

Outils :



Matlab



Simulink

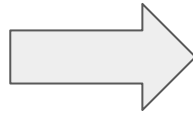
# Avant-propos : Qu'est ce que le contrôle automatique

**Principe : Faire suivre à un système une consigne le plus précisément possible, même en présence de turbulences**

## Critères de Performance

Stabilité

Rapidité



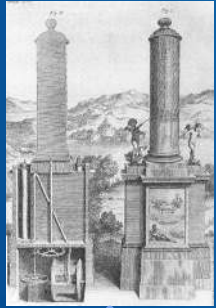
**Sans intervention  
humaine**

Précision

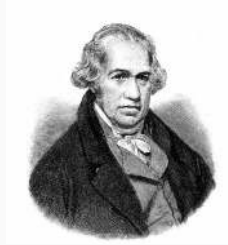
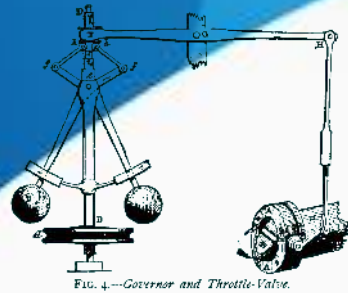
Dépassement

**Traiter des systèmes dynamiques,  
linéaires ou non**

# Partie I : Introduction - Point historique :



-300 Av.J-C



1738 - 1819

1788

Aviation,  
automobile...



XIXème sc

Industrie à vapeur

# Partie I : Introduction - Modélisation du système

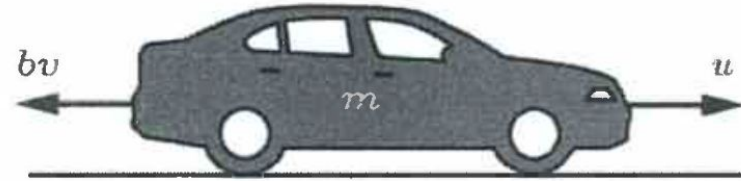
Caractéristiques véhicule :

$u$  : 500 N (Tension d'entrée)

$v$  = vitesse de sortie (m/sec)

$m$  = 1000 kg (masse du véhicule)

$b$  = 50 (coefficient de friction dans l'air)



*Schéma inventoriant les forces appliquées au système -*

**Mise en équation**

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = u - bv$$

*Seconde loi de Newton*

# Partie I : Introduction - Modélisation du système

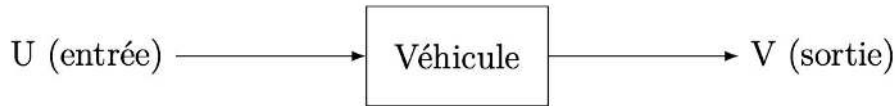
Passage dans le domaine fréquentiel :

$$\frac{dv}{dt} + \frac{b}{m}v = \frac{u}{m} \longrightarrow sV(s) + \frac{b}{m}V(s) = \frac{U(s)}{m}$$

Fonction de transfert :

$$F(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{ms + b} = \frac{1}{1 + \tau p} = \frac{0,001}{s + 0,05} \Leftrightarrow \underbrace{\tau = 20 \text{ sec}}$$

Constante  
de temps



*Schéma fonctionnel du véhicule - LaTeX (TiKz)*

# Partie I : Introduction - Modélisation du système

Tension d'entrée

Gain : inertie ( $1/m$ )

Intégrateur, intègre l'accélération

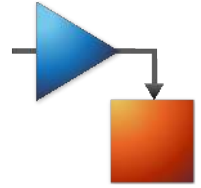
Comparateur :  
calcule la  
différence  
entre la sortie  
et l'entrée

Visualiser la sortie

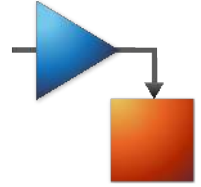
Damping

*Schéma fonctionnel véhicule en boucle ouverte - Simulink*

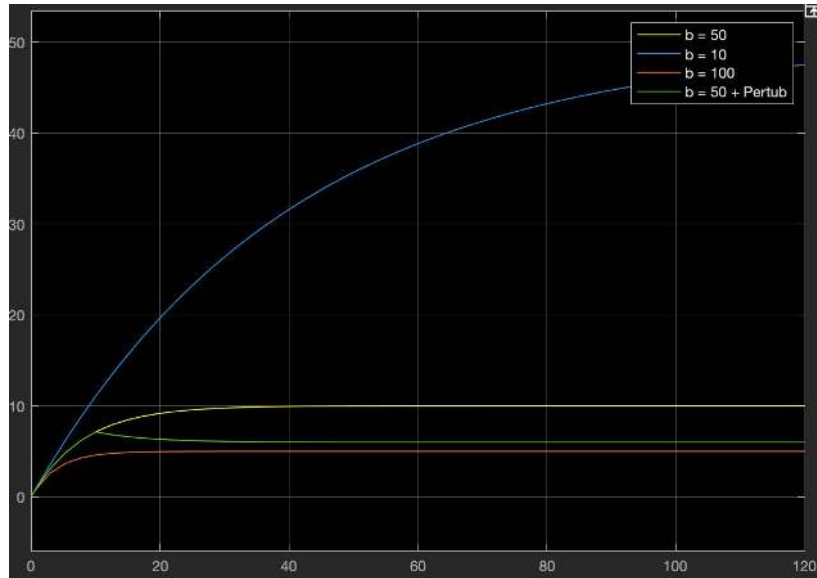
Coefficient de  
frottements de l'air



# Partie I : Introduction - Analyse en boucle ouverte



Observations du comportement dynamique



**Régime permanent** : influence de la constante de temps, paramètres système

**Perturbation** : erreur statique, pas de correction

Besoin de **régulation**

Visualisation de la sortie, sans correction



# Partie I : Introduction - Limites de la boucle ouverte et objectifs

*La boucle ouverte admet des limites :*

- **Ne rejette pas les perturbations**
- Système naturellement lent
- **Présence d'erreur statique**

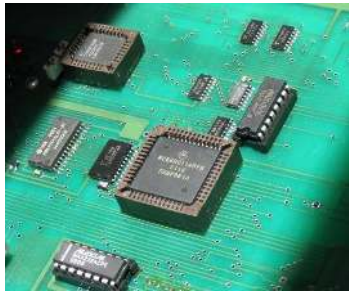
Il est nécessaire d'implémenter un **contrôleur automatique**.

*Objectifs :*

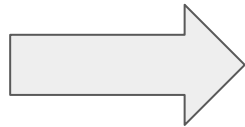
- Corriger l'écart entre l'entrée et la sortie lorsqu'il y a une perturbation
- Diminuer le temps de réponse  
Temps de réponse  $< 5\%$
- Supprimer l'erreur statique  
Erreur statique  $< 2\%$

# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

Qu'est ce qu'un régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) ?



*Schéma fonctionnel du régulateur - LaTeX (TiKz)*



Fonction codée sous forme d'algorithme

Microcontrôleur

# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

Qu'est ce qu'un régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) ?

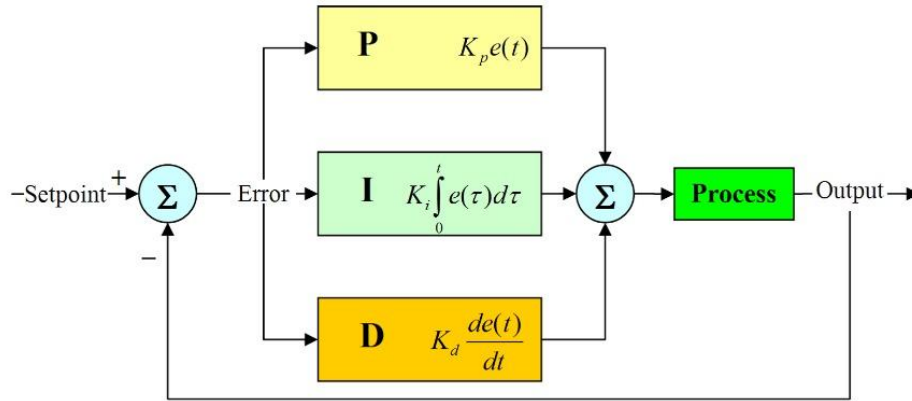


Schéma structure du PID (parallèle) - Wattco.fr

**Action Proportionnelle :** agit sur l'erreur instantanée, améliore notamment le temps de réponse tant que le système n'est pas trop oscillatoire

**Action Intégrale :** intègre l'erreur, supprime l'écart statique en régime permanent

**Action dérivée :** en dynamique, agit sur l'erreur et la stabilité si le système oscille

# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

## Structures de correcteur

Parallèle  $K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$

Série  $K(1 + \frac{1}{T_i s})(1 + T_d s)$

Mixte : La plus courante dans l'industrie

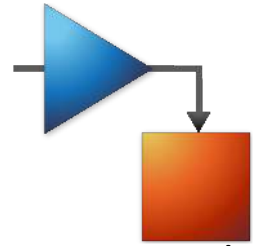
## Côté énergétique

Chaque action délimitée, énergiquement modérée

Gain proportionnel agit aussi sur les autres actions, la plus énergique des trois

Simple à gérer, compromis

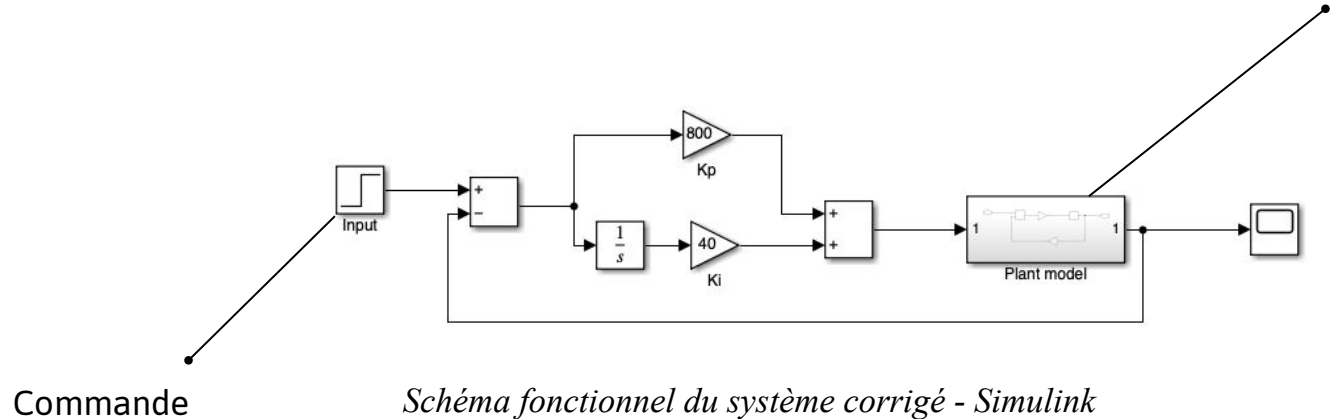
# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle



## Modélisation du régulateur

Ki : Gain  
intégral

Kp : Gain  
Proportionnel



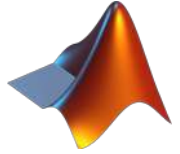
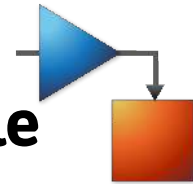
Système initial

Fonction du  
correcteur :

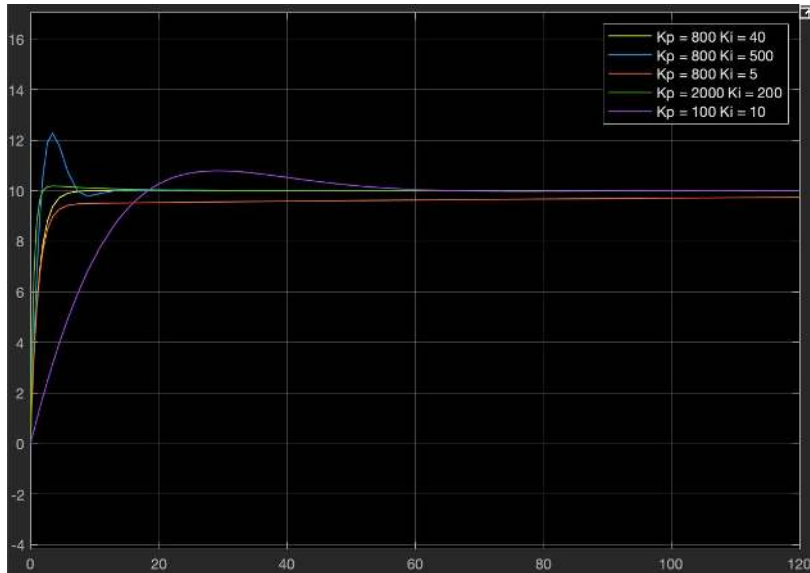
$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Structure parallèle

# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle



## Réglage empirique du régulateur

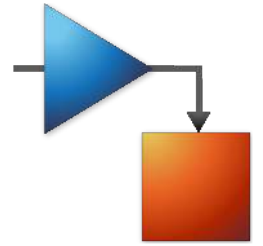


Réglages manuels empiriques

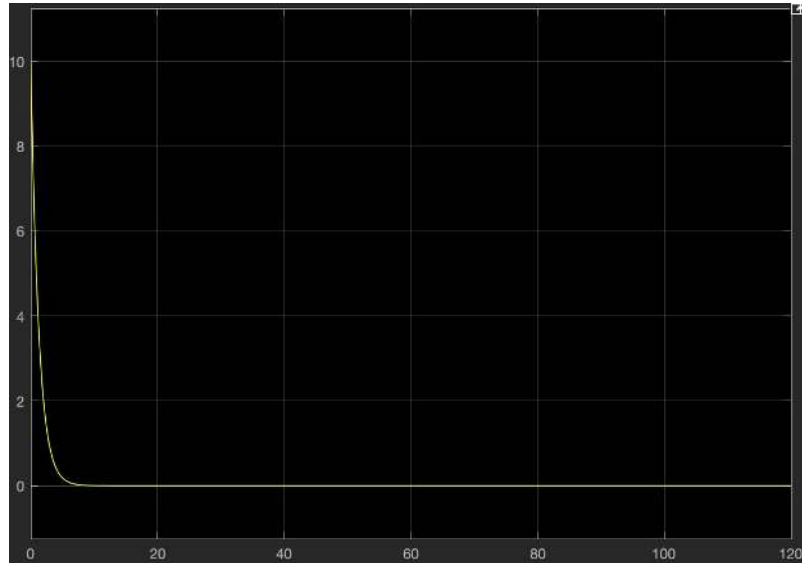
## Commentaires des résultats

- $K_p, K_i$  très grands : entraînent instabilité et dépassement
- $K_i$  faible : Erreur statique récalcitrante
- **Compromis :  $K_p = 800$   $K_i = 40$**

# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

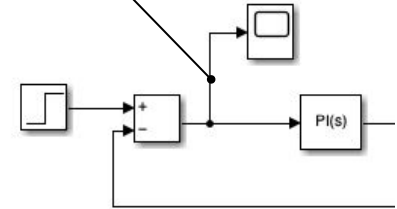


Étude de la robustesse du régulateur - tracer l'erreur



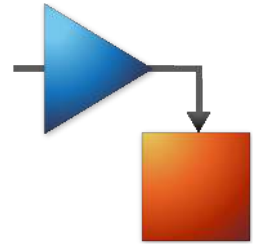
Sortie du comparateur, erreur corrigée

Erreur en sortie  
du comparateur

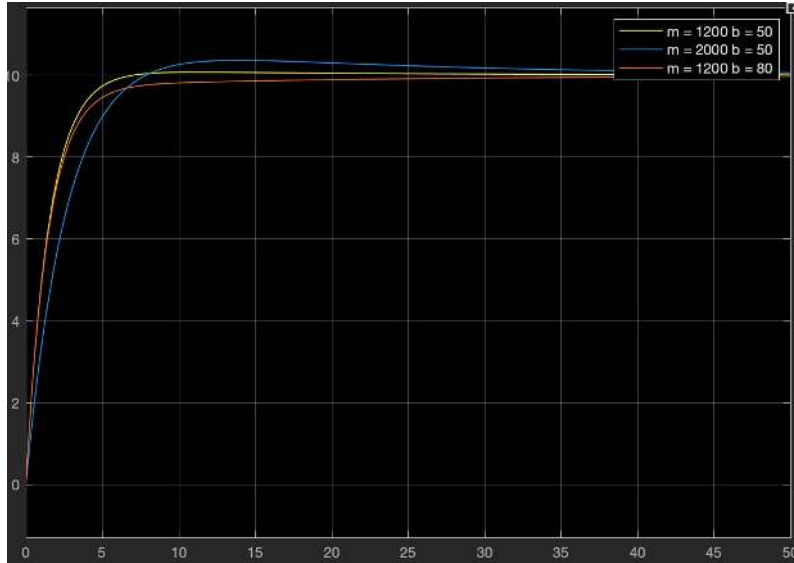


L'erreur diminue jusqu'à  
devenir nulle : le PI agit

# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle



Étude de la robustesse du régulateur - modifications de paramètres



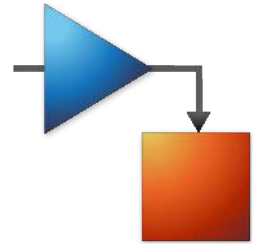
	<u>Temps de Réponse</u>	<u>Dépassement</u>	<u>Erreur régime permanent</u>
<b>Influence Masse</b>	Augmente	Léger	Négligeable
<b>Influence Friction</b>	Augmente peu	Légèrement en dessous de la consigne	Négligeable

*Tableau présentant l'influence des changements de paramètres sur les critères d'asservissement*

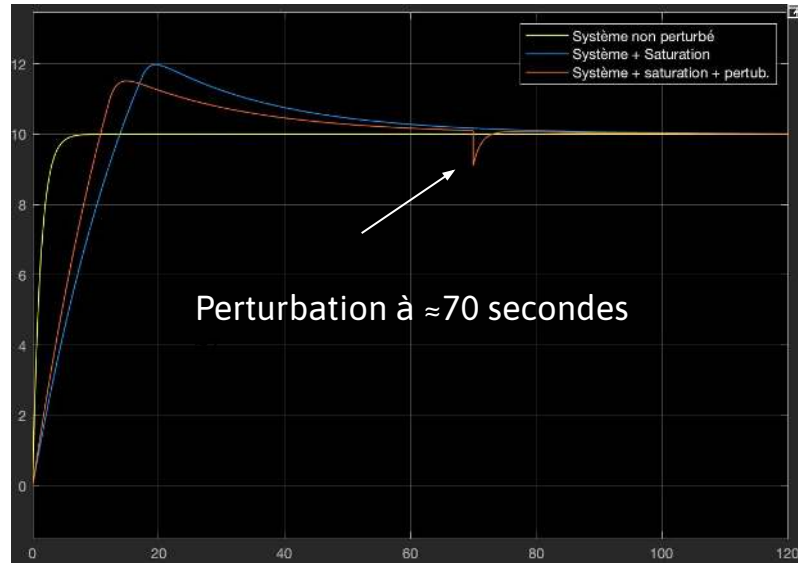
Sortie avec variations de masse, et de friction



# Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle



Étude de la robustesse du régulateur - modifications de paramètres



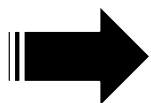
**Saturation** : bloque la commande

**Perturbation** : ex:  
vent  
Modélisée par un  
bloc de - 1 V

**Réaction** : dépassement, temps de réponse augmenté

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols

## Présentation de la méthode de Ziegler-Nichols



**Méthode heuristique**, basée sur l'expérimentation

Control Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$	$K_d$
P	$0.5K_u$	–	–	–	–
PI	$0.45K_u$	$0.83T_u$	–	$0.54K_u/T_u$	–
PD	$0.8K_u$	–	$0.125T_u$	–	$0.10K_uT_u$
classic PID <sup>[2]</sup>	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$	$1.2K_u/T_u$	$0.075K_uT_u$
Pessen Integral Rule <sup>[2]</sup>	$0.7K_u$	$0.4T_u$	$0.15T_u$	$1.75K_u/T_u$	$0.105K_uT_u$
some overshoot <sup>[2]</sup>	$0.33K_u$	$0.50T_u$	$0.33T_u$	$0.66K_u/T_u$	$0.11K_uT_u$
no overshoot <sup>[2]</sup>	$0.20K_u$	$0.50T_u$	$0.33T_u$	$0.40K_u/T_u$	$0.066K_uT_u$

*Tableau calcul des gains et temps - réglage Z.-N., Wikipédia*



Nathaniel B. Nichols, ingénieur  
américain, 1914-1997

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols

## Principe

**Problème** : faire osciller un premier ordre



Ajouter un retard, courant dans ce genre de systèmes

Nouvelle fonction de transfert :

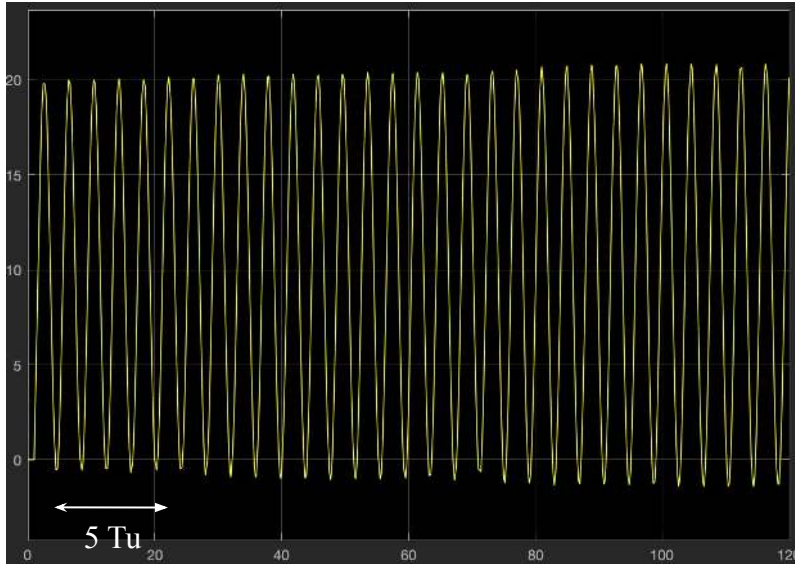
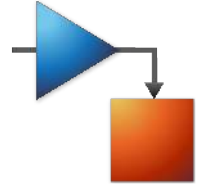
$$F(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{1 + \tau \cdot s}$$

**Retard** :  $e^{-\theta \cdot s}$

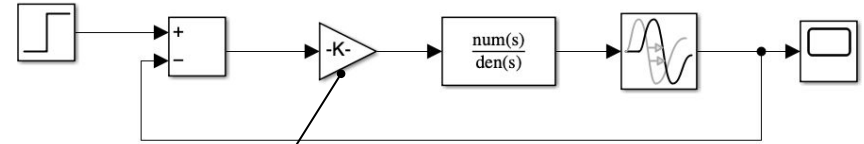
L'exponentielle admet un développement limité, donc on augmente l'ordre du système

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols

## Mesures expérimentales



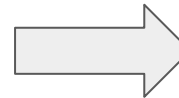
Système en limite de stabilité, Simulink



Correcteur P ( $K_p = K_u$ ) avec  
délai, Simulink

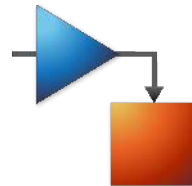
**Gain critique** :  $K_u = 1620$

**Période critique** :  $T_u$  mesurée : 3,983



En découlent les  
autres réglages des  
formules empiriques

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols



## Calcul des Gains

Formules :

$$K_p = 0,45 \cdot K_u = 729$$

$$T_i = 0,83 \cdot T_u = 3,3$$

$$K_i = \frac{0,54 \cdot K_p}{T_i} \approx 264,6$$

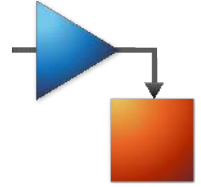


Formule du correcteur  
Nichols :

$$C_{ZN}(s) = 729 + \frac{265}{s}$$

- Gain  $K_p$  semble correct
- Mais gain semble  $K_i$  élevé

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols



Étude de la robustesse du régulateur (Z.N) - Tracer l'erreur



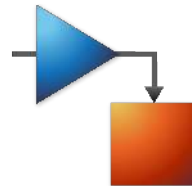
Corrige l'erreur rapidement, mais dépassement indésirable qu'on retrouve ici



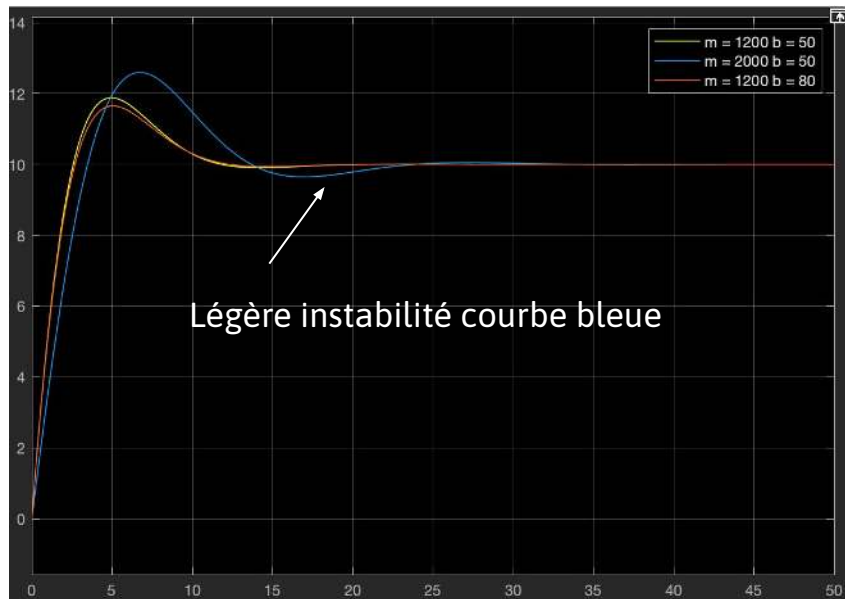
Dépassement : effet Windup , gain  $K_i$  trop élevé

Sortie du comparateur, erreur corrigée

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols



## Étude de la robustesse du régulateur (Z.N) - Variations de paramètres

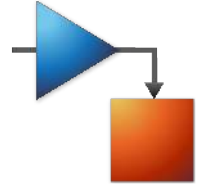


Réponses pour variations de paramètres (masse, frottements)

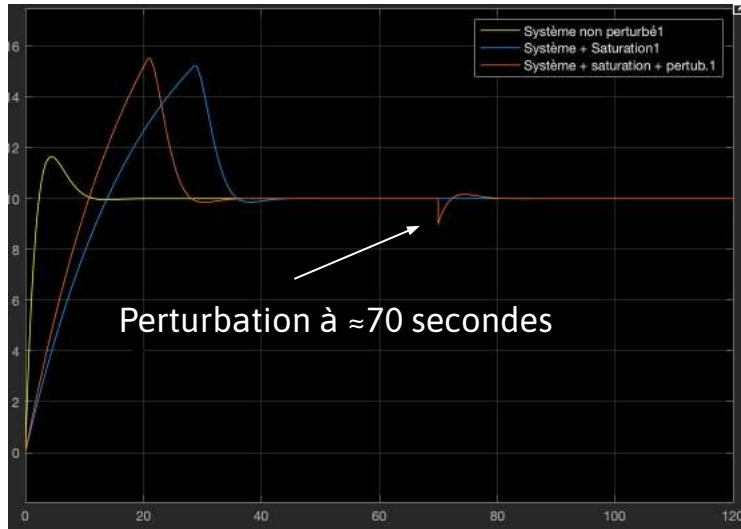
	<u>Temps de Réponse</u>	<u>Dépassement</u>	<u>Erreur régime permanent</u>
<b>Influence Masse</b>	Légère augmentation	Trop important +25%	Nulle
<b>Influence Friction</b>	Réagit bien face aux variations	Trop élevé +20%	Nulle

Tableau présentant l'influence des changements de paramètres sur les critères d'asservissement

# Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols



Étude de la robustesse du régulateur (Z.N) - Influence de la saturation et d'une perturbation



Influence de la saturation : grand dépassement

En revanche, correction des perturbation : **acceptable**

Sortie perturbée, saturation, vent



# Conclusion - Synthèse des résultats

## Conclusion tirée des résultats précédents

	<u>Réglage à la main</u>	<u>Ziegler - Nichols</u>
Dépassement	Peu de dépassement sauf par effet <b>windup</b>	<b>Dépassement</b> indésirable dû au gain <b>Ki élevé</b>
Temps de réponse	La saturation l' <b>augmente</b>	Augmenté par la saturation et changements de paramètres
Erreur statique	Toujours corrigée	Corrigée, négligeable dans certains cas

*Tableau récapitulatif des résultats*

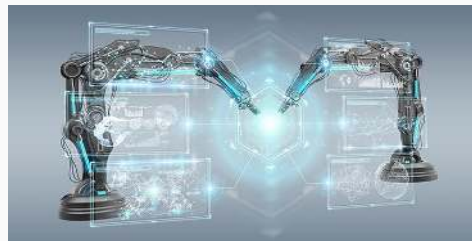
# Conclusion - Domaines d'application

Ingénierie des  
systèmes  
intelligents



Voitures  
autonomes

Robotique



- Assurer un suivi de consigne
- Coordonner plusieurs axes ou moteurs

Industrie



Aussi voir correcteurs  
**adaptatifs**

# Synthèse

## Bilan d'ensemble

- Modélisation d'un système linéaire
- Comparaison de deux méthodes
- Utilisation de Simulink et Matlab

## Perspectives futures

- Programmer un régulateur sur un microcontrôleur

- IRIS  ÉCOLE D'INGÉNIEURS

*Parcours IngerieRie, sciences des données Informations, Systèmes*

Merci de votre attention.

Je suis ouverte à vos questions.

*Je remercie Monsieur BALMAT Jean-François pour son aide, ses conseils, et son temps accordé à mon travail.*

# Bibliographie - Sitographie

- *Historique de la Clepsydre*, <http://www.meridienne.org/atelier/instruments/clepsydre/historique/>
- *Un système auto-asservi : le régulateur de Watt*,  
<https://couleur-science.eu/?d=38d808--un-systeme-auto-asservi-le-regulateur-de-watt>,  
19 MAI 2022, T. VAN NEERDEN
- Jean-François BALMAT, *Cours automatique L1 années précédentes*
- Laurent BARATCHART, Pierre BERNHARD, *Automatique et systèmes*, 10 Août 1992.

# Bibliographie - Sitographie

- Ziegler, J.G. & Nichols, N.B. , *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Transactions of the ASME, Vol. 64, pp. 759–768, 1942
- Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth Edition
- Higher Meditation Ziegler Nichols PID Tuning Method Using Simulink (Fev. 2021)  
<https://www.youtube.com/watch?v=MRA-yt22j5I>
- *Proportional–integral–derivative controller*, Wikipédia  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional–integral–derivative\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional–integral–derivative_controller)

# Bibliographie - Sitographie

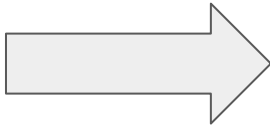
- MathWorks, *PID Controller Block Reference* (Simulink documentation)
- EXPLICATION DU RÉGULATEUR PID : TYPES, UTILISATIONS ET FONCTIONNEMENT,  
<https://www.wattco.com/fr/2024/07/controleur-pid-explique/>
- Asservissements et modélisation, CPGE TSI Colmar

# Slide Annexe : pour questions

Pourquoi pas construire un PID complet ?

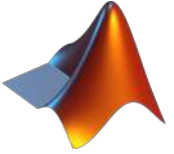
Action **dérivée** : agit  
efficacement sur la rapidité et  
la stabilité si le système **oscille**  
un peu trop

$$F(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{ms + b}$$



Peu pertinent, le système étant  
un **premier ordre**

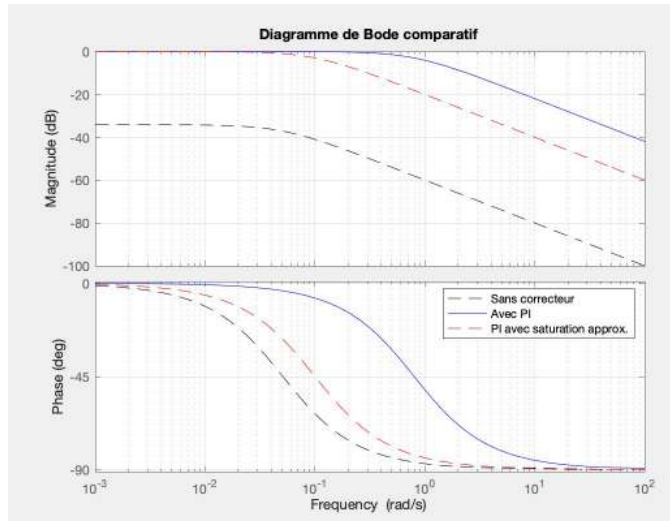




# Slide Annexe : pour questions

Analyse de la fonction de transfert en boucle fermée :  
(PI Partie II)

$$T(s) = \frac{V(s)}{V_{consigne}(s)} = \frac{C(s) \cdot F(s)}{1 + C(s) \cdot F(s)}$$



```
clc; clear; close all;
```

```
F = tf(0.001, [1 0.05]);
```

```
Kp = 800;
```

```
Ki = 40;
```

```
C = tf([Kp Ki], [1 0]);
```

```
T_open = feedback(F, 1);
```

```
T_PI = feedback(C * F, 1);
```

```
Gain_saturation = 0.125;
```

```
C_sat = tf([Kp*Gain_saturation Ki*Gain_saturation], [1 0]);
```

```
T_sat = feedback(C_sat * F, 1);
```

```
figure;
```

```
bode(T_open, 'k--', T_PI, 'b', T_sat, 'r--');
```

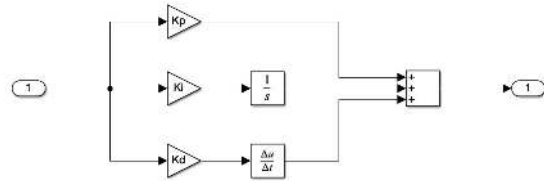
```
legend('Sans correcteur', 'Avec PI', 'PI avec saturation approx.');
```

```
grid on;
```

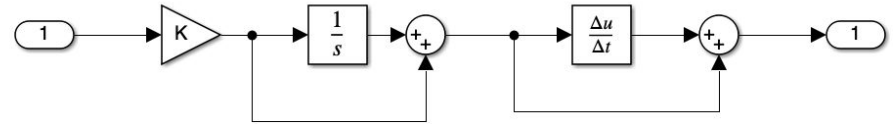
```
title('Diagramme de Bode comparatif');
```

# Slide Annexe : pour questions

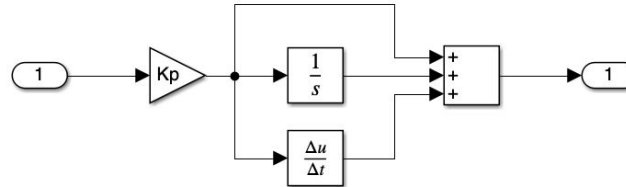
## Structures de correcteurs - Schémas



*Structure Parallèle, Simulink*



*Structure Série, Simulink*



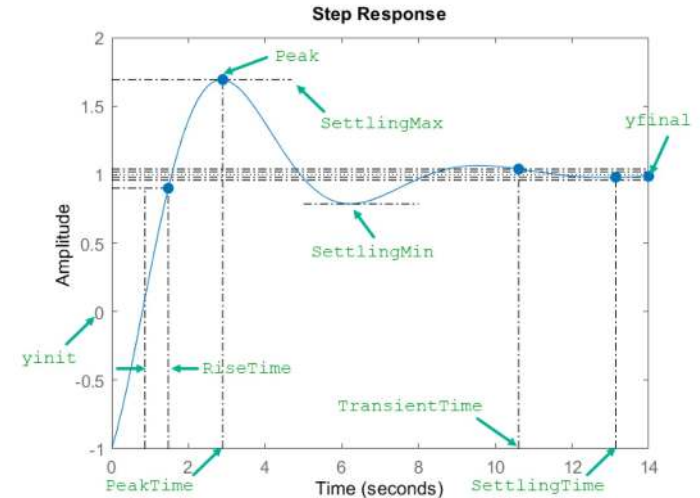
*Structure Mixte, Simulink*

# Slide Annexe : pour questions

Extraction du modèle de Simulink à Matlab, et fonction Stepinfo()

```
[A,B,C,D]=linmod('modele') ;  
[num,den]=ss2tf(A,B,C,D);  
F = tf(num,den);  
Stepinfo(F);
```

Code Matlab



*MathWorks, Matlab documentation*