

Systèmes asservis, régulateur de vitesse, performances et stabilité

Charlotte JOUVE

L2 SI 2024-2025

Tuteur : Jean-François BALMAT

Laboratoire : LIS

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

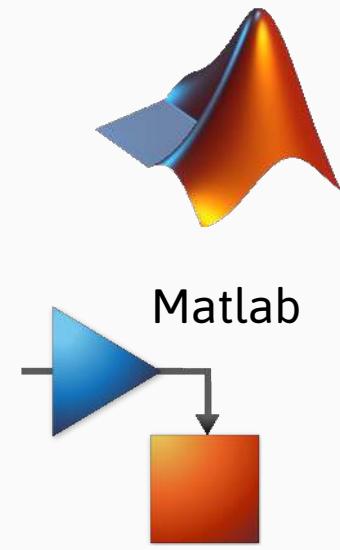
Contexte - objectifs

- 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 et un régulateur **PI** (méthode **empirique**)
- Régler le PI avec la méthode de **Ziegler-Nichols**
- Synthèse des résultats - Conclusion

Outils :



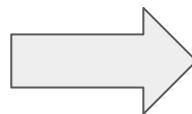
Avant-propos : Qu'est ce que le contrôle automatique

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

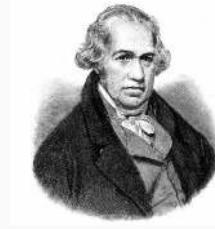
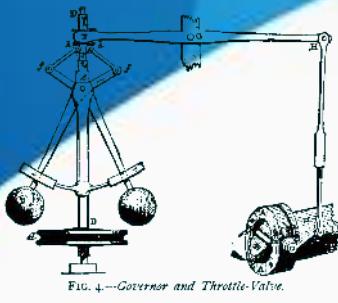
Traiter des systèmes dynamiques, linéaires ou non

Partie I : Introduction - Point historique :



-300 Av.J-C

[...]



1738 - 1819

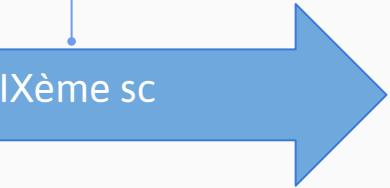
Industrie à vapeur

Aviation,
automobile...



1788

XIXème sc



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 (coefficients de friction
dans l'air)

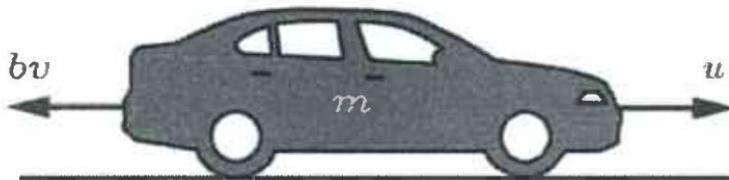


Schéma inventoriant les forces appliquées au système -

Mise en équation

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = u - bv \quad \text{Seconde loi de Newton}$$

Partie I : Introduction - Modélisation du système

Passage dans le domaine fréquentiel :

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

Fonction de transfert :

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

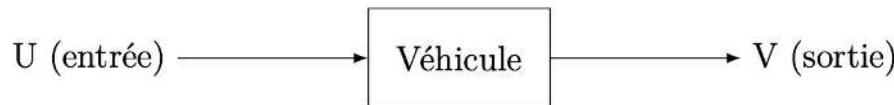
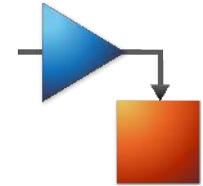
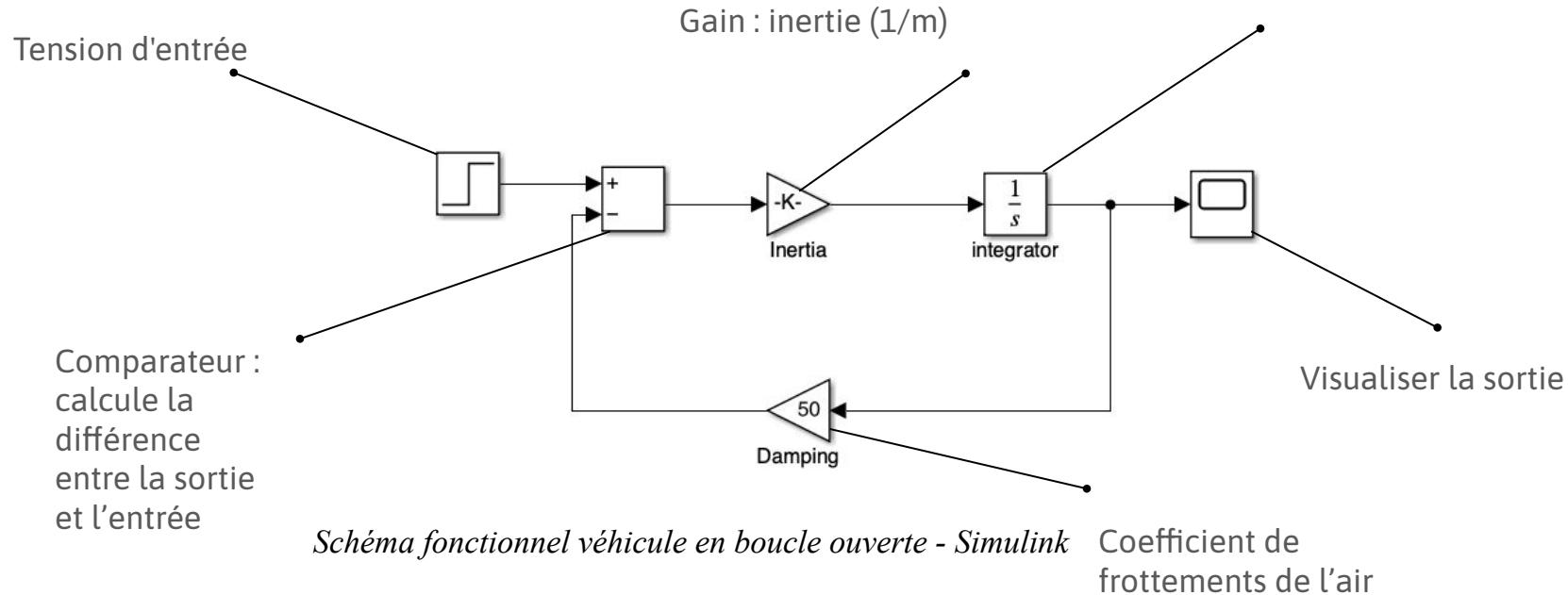
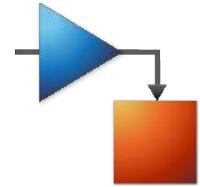


Schéma fonctionnel du véhicule - LaTeX (TiKz)



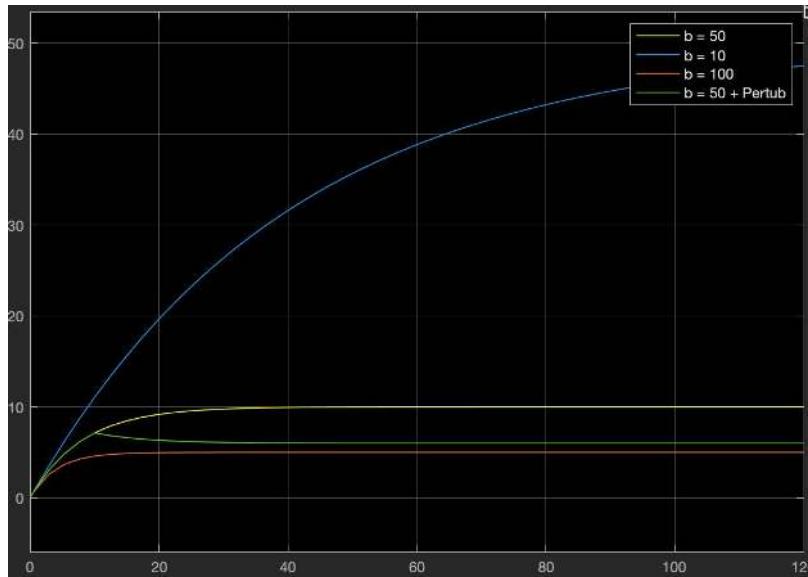
Partie I : Introduction - Modélisation du système





Partie I : Introduction - Analyse en boucle ouverte

Observations du comportement dynamique



Visualisation de la sortie, sans correction

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

Perturbation : erreur statique, pas de correction

Besoin de **régulation**

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-Integral-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-Integral-Dérivé) ?

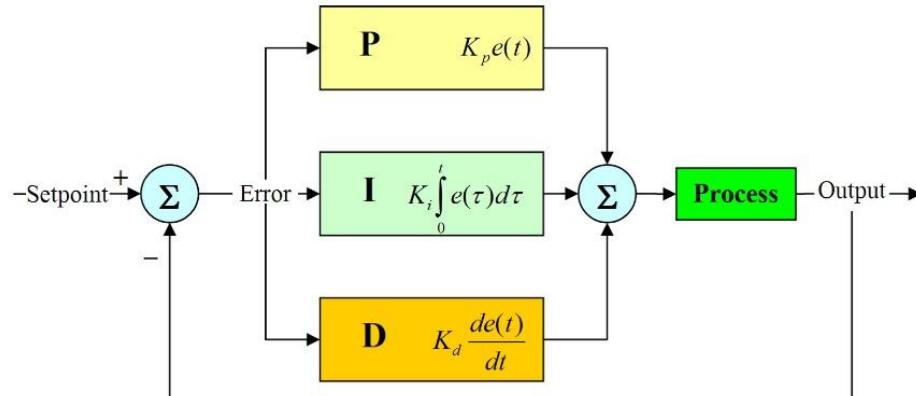


Schéma structure du PID (parallèle) - Wattco.fr

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

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

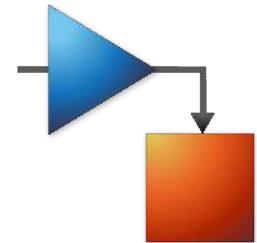
Mixte : La plus courante dans l'industrie

Côté énergétique

Chaque action délimitée, énergiquement modérée

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

Simple à gérer, compromis

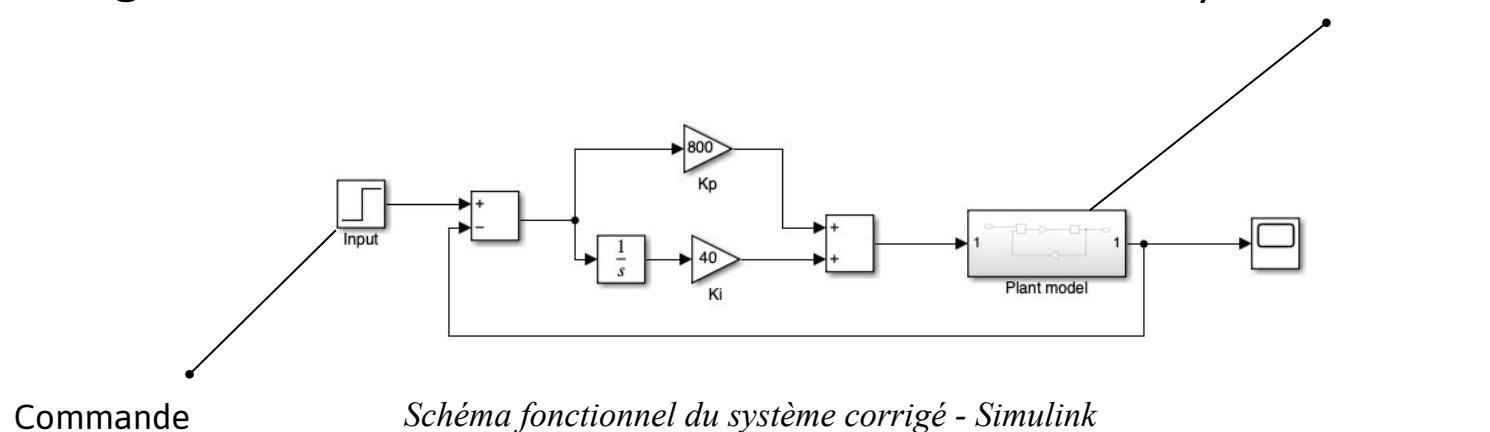


Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

Modélisation du régulateur

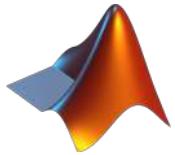
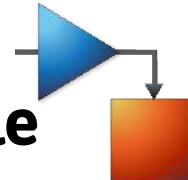
Ki : Gain intégral

Kp : Gain Proportionnel



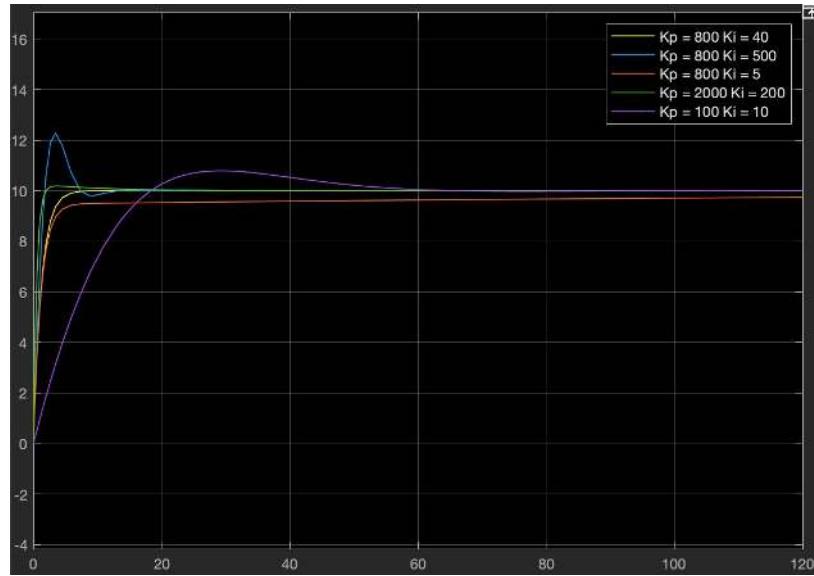
Fonction du correcteur :

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



Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

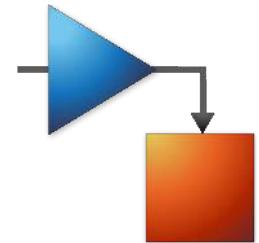
Réglage empirique du régulateur



Réglages manuels empiriques

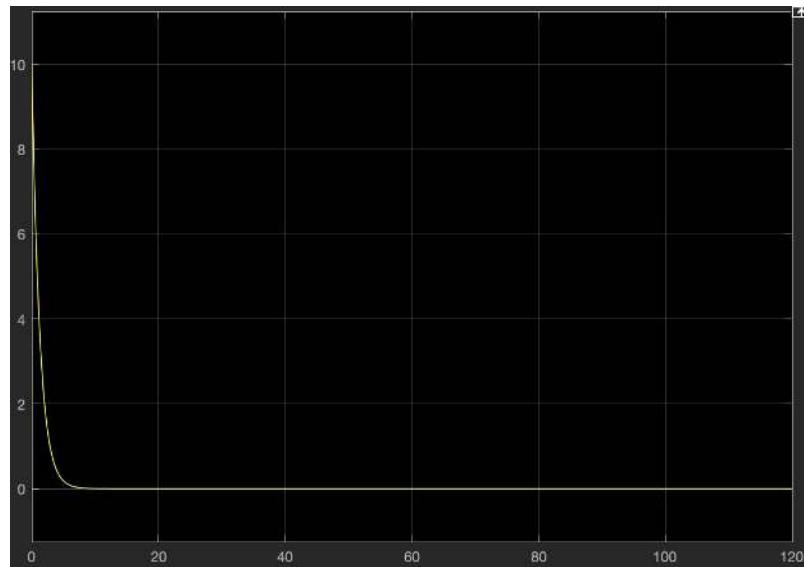
Commentaires des résultats

- K_p, K_i très grands : entraînent instabilité et dépassement
- K_i faible : Erreur statique récalcitrante
- Compromis : $K_p = 800 \text{ Ki} = 40$



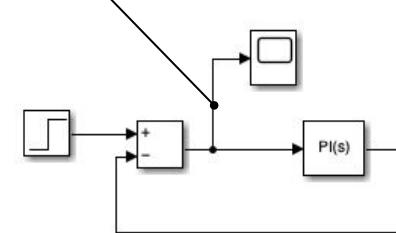
Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

Étude de la robustesse du régulateur - tracer l'erreur

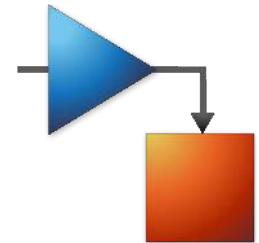


Sortie du comparateur, erreur corrigée

Erreure en sortie
du comparateur

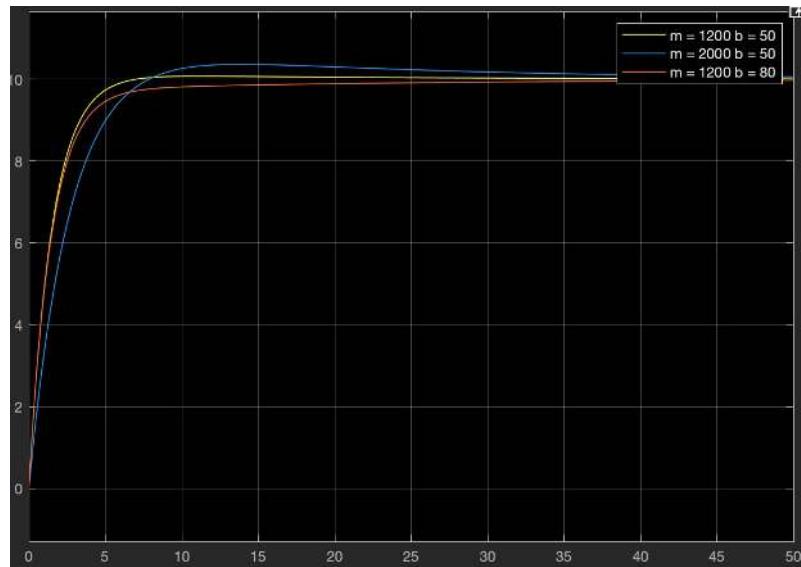


L'erreur diminue jusqu'à devenir nulle : le PI agit



Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

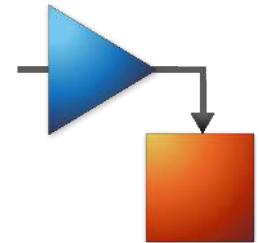
Étude de la robustesse du régulateur - modifications de paramètres



Sortie avec variations de masse, et de friction

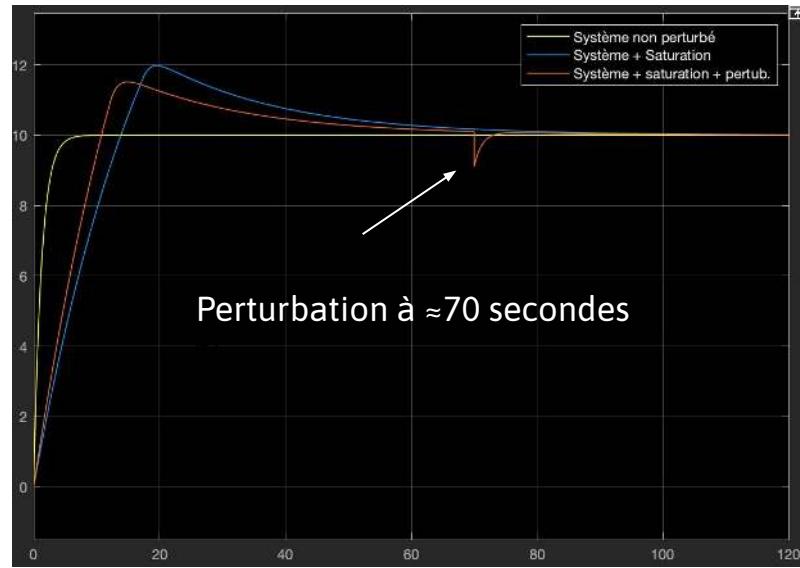
	<u>Temps de Réponse</u>	<u>Dépassemant</u>	<u>Erreur régime permanent</u>
Influence Masse	Augmente	Léger	Négligeable
Influence Friction	Augmente peu	Légèrement en dessous de la consigne	Négligeable

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



Partie II : Implémentation d'un moyen de contrôle

Étude de la robustesse du régulateur - modifications de paramètres



Sortie avec commande saturée, et signal perturbé

17/28

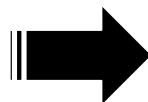
Saturation : bloque la commande

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	$0.8K_u$	–	$0.125T_u$	–	$0.10K_u T_u$
classic PID ^[2]	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$	$1.2K_u/T_u$	$0.075K_u T_u$
Pessen Integral Rule ^[2]	$0.7K_u$	$0.4T_u$	$0.15T_u$	$1.75K_u/T_u$	$0.105K_u T_u$
some overshoot ^[2]	$0.3\bar{3}K_u$	$0.50T_u$	$0.3\bar{3}T_u$	$0.6\bar{6}K_u/T_u$	$0.1\bar{1}K_u T_u$
no overshoot ^[2]	$0.20K_u$	$0.50T_u$	$0.3\bar{3}T_u$	$0.40K_u/T_u$	$0.06\bar{6}K_u T_u$



Nathaniel B. Nichols, ingénieur américain, 1914-1997

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

Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols

Principe

Problème : faire osciller un premier ordre



Ajouter un retard, courant dans ce genre de systèmes

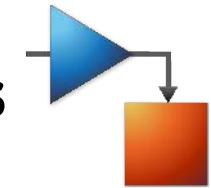
Nouvelle fonction de transfert :

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

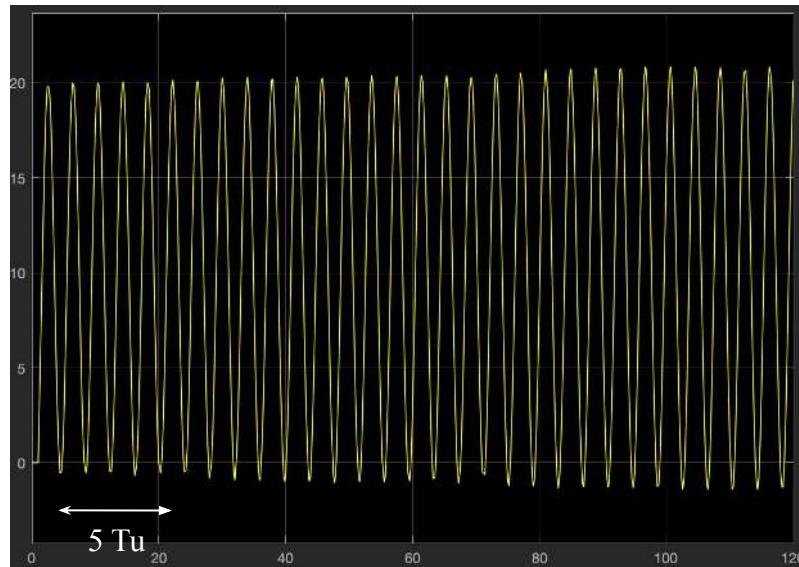
Retard : $e^{-\theta \cdot s}$

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

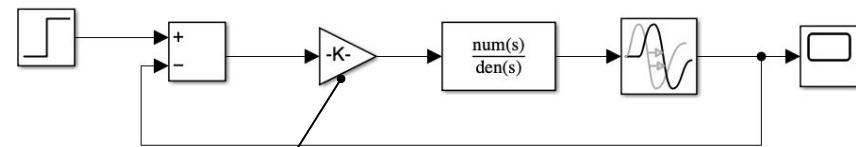
Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols



Mesures expérimentales



Système en limite de stabilité, Simulink



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

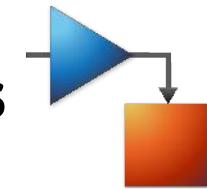
Gain critique : $K_u = 1620$

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 :

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

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

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

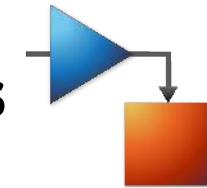


Formule du correcteur Nichols :

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

- 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

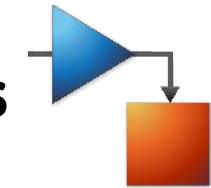


Corrige l'erreur rapidement, mais dépassement indésirable qu'on retrouve ici

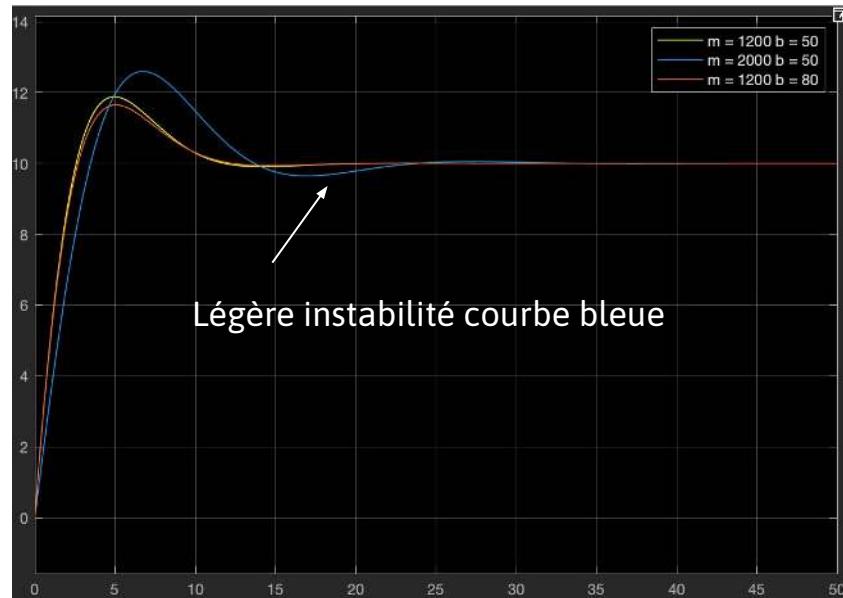


Dépassement : effet Windup , gain Ki trop élevé

Partie III : Contrôle avec méthode de Ziegler-Nichols



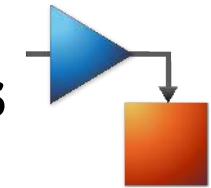
Étude de la robustesse du régulateur (Z.N) - Variations de paramètres



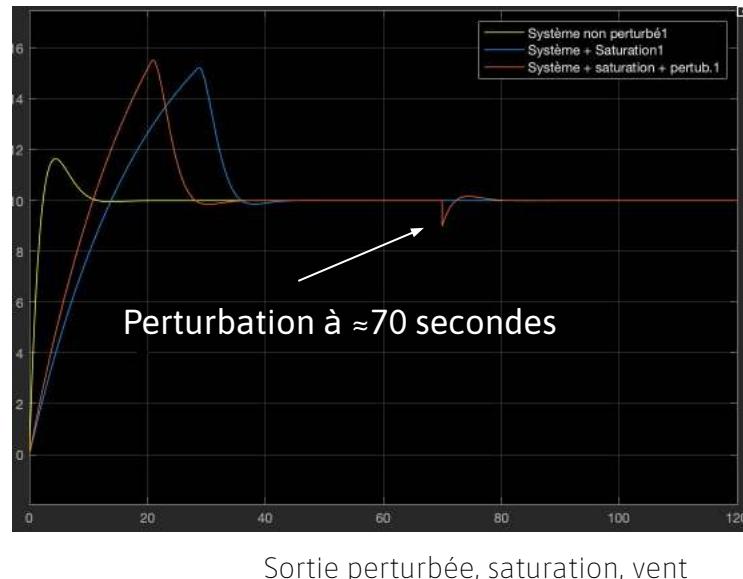
	<u>Temps de Réponse</u>	<u>Dépassement</u>	<u>Erreur régime permanent</u>
Influence Masse	Légère augmentation	Trop important +25%	Nulle
Influence Friction	Réagit bien face aux variations	Trop élevé +20%	Nulle

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

Conclusion - Synthèse des résultats

Conclusion tirée des résultats précédents

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

Tableau récapitulatif des résultats

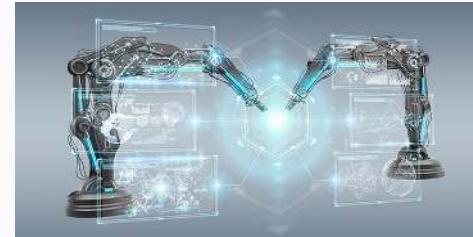
Conclusion - Domaines d'application

Ingénierie des systèmes intelligents



Voitures autonomes

Robotique



Industrie



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



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  SeaTech
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

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

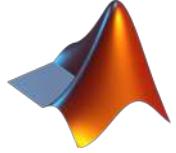
Pourquoi pas construire un PID complet ?

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

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



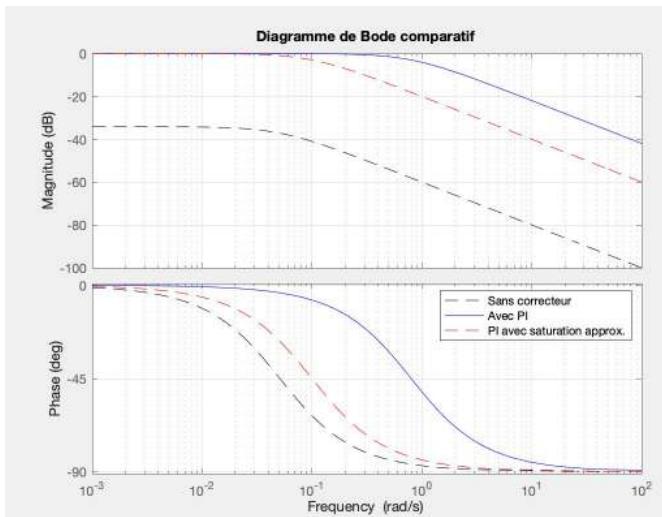
Peu pertinent, le système étant un **premier ordre**



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);

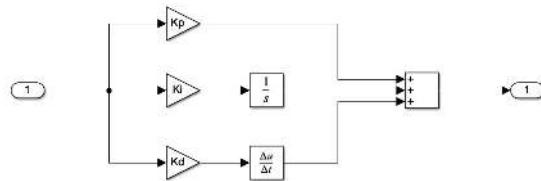
T_PI = feedback(C * F, 1);

Gain_saturation = 0.125;
C_sat = tf([Kp*Gain_saturation Ki*Gain_saturation], [1 0]);
T_sat = feedback(C_sat * F, 1);

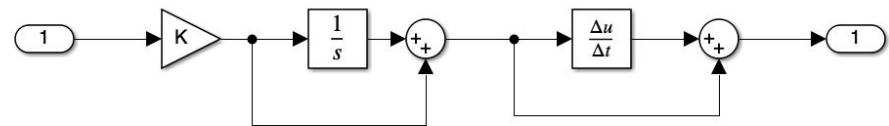
figure;
bode(T_open, 'k--', T_PI, 'b', T_sat, 'r--');
legend('Sans correcteur', 'Avec PI', 'PI avec saturation approx.');
grid on;
title('Diagramme de Bode comparatif');
```

Slide Annexe : pour questions

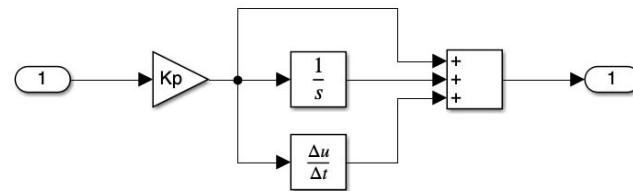
Structures de correcteurs - Schémas



Structure Parallèle, Simulink



Structure Série, Simulink



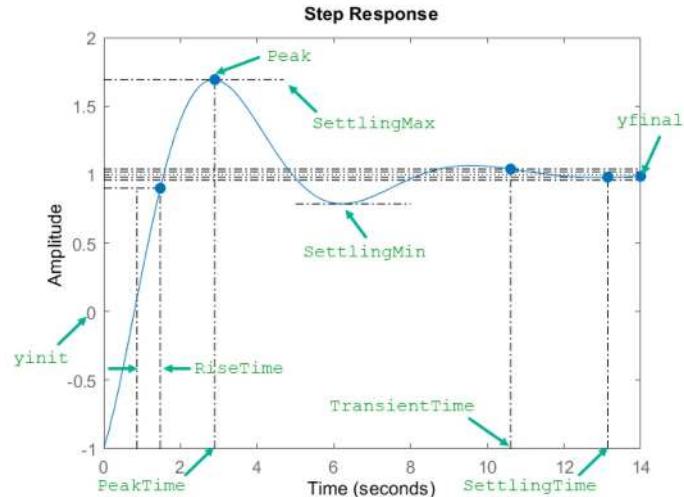
Structure Mixte, Simulink

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