



# PROCESS CONTROL

PID

Systemes de contrôle des processus



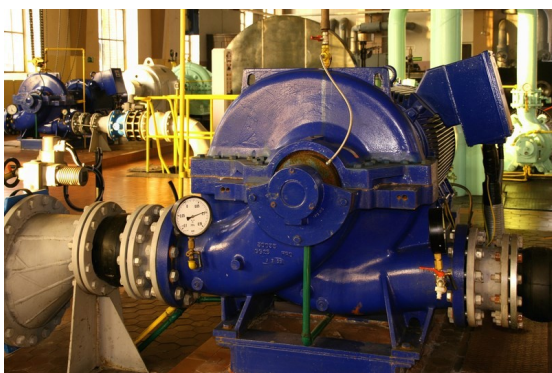
**matrix**

CP3720

[www.matrixsl.com](http://www.matrixsl.com)

Copyright © 2019 Matrix Technology Solutions Limited

Fiche de travail 1 - Comprendre l'entraînement	3
Feuille de travail 2 - Comprendre les capteurs	7
Feuille de travail 3 - Systèmes de commande tout ou rien	9
Feuille de travail 4 - constante de temps du système	10
Feuille de travail 5 - Contrôleur P	12
Feuille de travail 6 - Contrôleur PI	16
Feuille de travail 7 - Contrôleur PID	19
Feuille de travail 8 - Algorithme de Zeigler Nichols	22
Feuille d'activité 9 - Remontée d'intégrale	24
Feuille de travail 10 - Filtre dérivé	26
Feuille de travail 11 - Réglage manuel	28
Fiche 12 - Pendule asservi - contrôle de l'angle	29
Interfaçage avec MATLAB/LabView	27



Pompes de contrôle des processus pour l'eau, l'huile, les aliments...

Les matières premières, l'air et les autres matériaux sont au cœur de chaque système. Comprendre comment contrôler les dispositifs de conduite est une partie importante de la compréhension du contrôle des processus.

Cette photographie montre une pompe dans une station de pompage d'eau.

	Débit	Niveau	Température	Pression	Servo Pendule
Système d'entraînement	Pompe à eau	Pompe à eau	Chauffage	Pompe à air	Moteur à courant continu
Actionneur de perte	Vanne variable	Vanne variable	Bafle	Vanne numérique avec ajusteur manuel	Paliers
Méthode des pertes	Restriction	Fuite de fluide	Perte de chaleur	Fuites d'air	Friction

### À vous de jouer :

- 1) Assurez-vous d'avoir lu le manuel de référence de Process Control et d'avoir compris le fonctionnement de votre système, d'avoir installé les pilotes, les logiciels et le système d'exploitation. etc.
- 2) Pour le système que vous utilisez, ouvrez l'application Manual. Par exemple : "Ouvrir ManualControl.bat".
- 3) Appuyez sur le bouton "GO" dans le coin supérieur gauche. Si votre appareil est correctement connecté et que les pilotes sont installés, cliquez sur le bouton "APPLICATION", Les voyants "COMMUNICATIONS" doivent s'allumer.
- 4) Si vous utilisez l'appareil de débit ou de niveau, vous devrez étalonner et mettre à zéro le capteur.
- 5) Tous les systèmes sont dotés d'un système d'ajustement des pertes mécanique : par exemple une valve. Réglez-le de manière à ce qu'il n'y ait pas de CHARGE.
- 6) Faites glisser le curseur DRIVE de manière à ce qu'il soit désactivé - en position 0. Appuyez sur la touche RUN. Votre système est maintenant en marche mais le lecteur est éteint.
- 7) Déplacez le curseur du lecteur jusqu'à 50 % et surveillez ce qui se passe dans votre système. Essayez différents % de lecteurs.
- 8) Régler la CHARGE de façon à ce qu'il y ait une certaine charge dans le système et que celui-ci soit stable. Avec Level and Flow, la charge est régulée par un dispositif mécanique. avec de nombreux réglages. Dans le cas de la température, il s'agit d'un ventilateur et d'un bafle que vous réglez manuellement. Dans le cas de la pression, il s'agit d'une vanne marche/arrêt avec une ouverture réglable pour la perte d'air.
- 9) La CHARGE étant à ce niveau donné, faire varier la La sortie DRIVE augmente de 0 à 100 % par paliers de 10 %. Laissez le système se stabiliser et faites unnoter les valeurs dans le tableau et le graphique de la page suivante.

**Débit**

**Niveau**

**Température**

**Pression**

LOAD % :

LOAD % :

LOAD % :

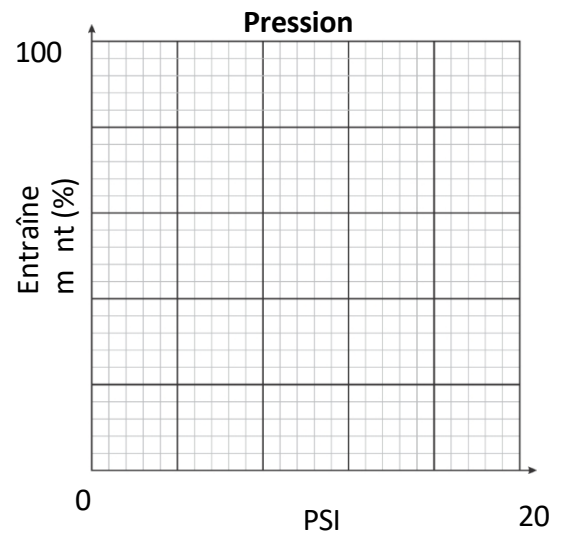
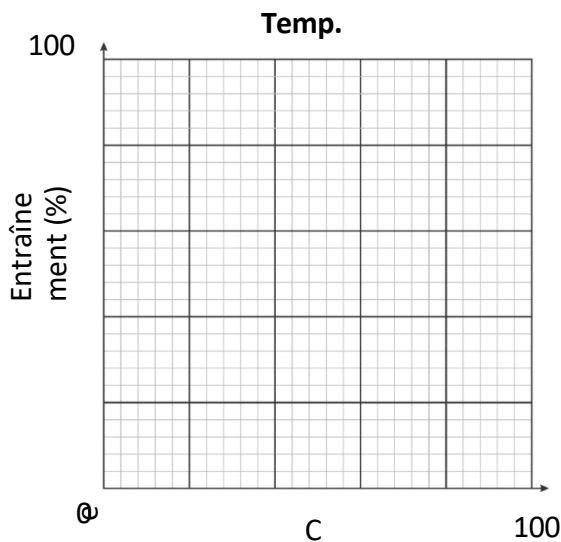
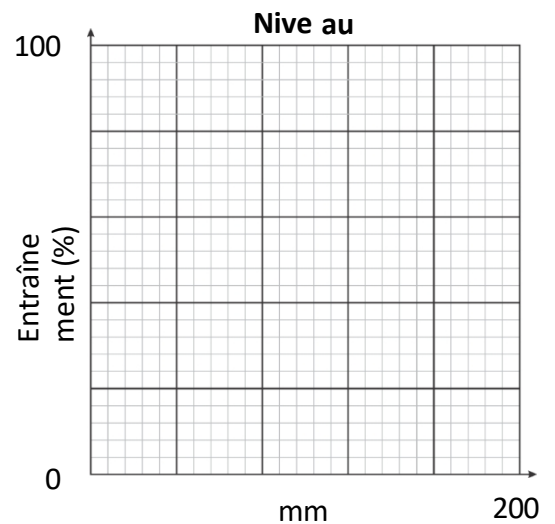
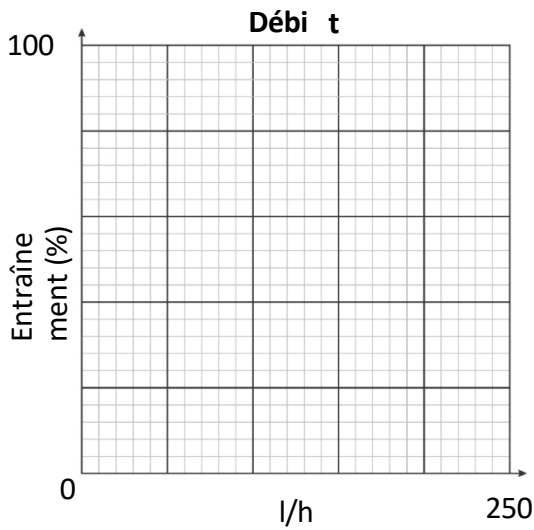
LOAD % :

Sortie de l'entraînement %	Lecture manuelle l/h
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	

Sortie de l'entraînement %	Lecture manuelle mm
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	

Sortie de l'entraînement %	Lecture manuelle C
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	

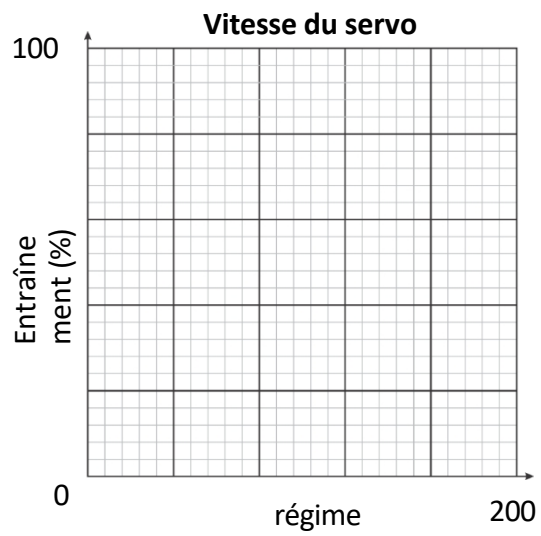
Sortie de l'entraînement %	Lecture manuelle psi
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	



### Servo pendule - vitesse

CHARGE : pas de poids

Sortie de l'entraînement	Lecture manuelle
5	
10	
15	
20	
25	



# Fiche de travail 1

## Comprendre l'entraînement



### Et alors ?

#### Gamme

Ces expériences vous montrent qu'un système avec une charge donnée a une certaine GAMME. Le rendement ne descend pas à 0 ou ne monte pas à l'infini. Il y a un taux minimum qui peut être atteint et un taux maximum qui peut être atteint.

La fourchette est déterminée par plusieurs éléments :

- La capacité de l'entraînement : la puissance de la pompe ou du chauffage.
- La charge naturelle du système : frottement dans les tuyaux, charge thermique
- La charge utile d'un système - les fuites, l'effet de refroidissement du ventilateur. C'est vous qui choisissez cette charge.

#### Conduire

Le système aura une certaine puissance. Cette puissance est importante pour les performances globales du système. Cependant, pour les besoins des équations du système, ce qui est vraiment important, c'est le pourcentage d'entraînement du système : de 0 % à 100 % de puissance. Ce pourcentage est spécifié.

#### Facteur d'échelle de la sortie

Chaque système a une valeur maximale. La valeur maximale du variateur est de 100 %. Le facteur d'échelle de sortie pour chaque système est défini comme le rapport entre la valeur maximale de l'entraînement et la valeur maximale du système. La valeur maximale du système pour la pression est le point auquel la pompe ne peut plus fournir d'air dans le système : environ 20 psi. Pour la température, il s'agit d'environ 100°C : le maximum que nous voulons que la température atteigne. Pour le niveau, il s'agit de 200 mm - le niveau auquel le tuyau de trop-plein évacue l'eau du cylindre. Pour le débit, il s'agit d'environ 250 l/h - le maximum réalisable. Pour la vitesse servo, la vitesse maximale est d'environ 200 tr/min à 25 % d'entraînement. Pour les systèmes en boucle ouverte, le facteur de mise à l'échelle de la sortie est important. Pour les systèmes en boucle fermée, il devient beaucoup moins important.

#### À vous de jouer :

Pour chaque système, calculer le facteur d'échelle de sortie.

Débit :

Température :

OSF : \_\_\_\_\_

OSF : \_\_\_\_\_

Niveau :

Pression :

OSF : \_\_\_\_\_

OSF : \_\_\_\_\_

Servo pendule - vitesse

OSF : \_\_\_\_\_

Pour chaque système, expérimentez les valeurs de la chargeso (utilisez une valeur d'entraînement de 25 %) de chaque système que vous comprenez le fonctionnement

# Feuille de travail 2

## Comprendre les capteurs



Les sorties des capteurs doivent être converties par les ordinateurs en valeurs qui ont un sens dans notre équation de contrôle. Pour certains systèmes, cette conversion est prise en charge par le capteur lui-même. D'autres systèmes nécessitent un étalonnage. Tous les systèmes doivent être vérifiés pour s'assurer que la valeur du capteur est correcte. Cette photo montre un capteur de débit typique comme celui de l'appareil de mesure du débit.

### À vous de jouer :

- 1) Assurez-vous d'avoir lu la section du manuel de référence du contrôle des processus consacrée aux capteurs et à leur fonctionnement. Vous y apprendrez comment chaque capteur est étalonné.
- 2) Ouvrez l'application Manuel en exécutant Ouvrir ManualControl.bat'.
- 3) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche.
- 4) Réglez la CHARGE de façon à ce qu'il y ait une certaine charge dans le système. Pour la pression, le niveau et le débit, il s'agit d'une vanne mécanique. Dans le cas de la température, il s'agit d'un ventilateur et d'un baffle que vous réglez manuellement. Pour le pendule asservi, la charge consiste à ajouter des poids.
- 5) La procédure de mise à zéro et d'étalonnage du capteur pour chaque système de contrôle de processus est légèrement différente. Suivez la procédure appropriée pour vous assurer que votre système est étalonné.

### Débit :

- 1) Le facteur d'échelle d'entrée peut être calculé à partir de la fiche technique, comme indiqué dans la Référence document.
- 2) Pour plusieurs valeurs d'entraînement, notez la lecture du logiciel et le capteur Rotameter. lisez. Tracez un graphique et mesurez la pente pour déterminer le facteur d'étalonnage dont vous avez besoin.
- 3) Ajustez la propriété du facteur d'étalonnage dans le logiciel et vérifiez que le logiciel est maintenant donne la même lecture que le rotamètre.

### Niveau :

- 1) Ouvrir le robinet pour vider le réservoir de niveau.
- 2) Commencez par un facteur d'échelle d'entrée faible - par exemple 0,001 - et saisissez-le dans les propriétés.
- 3) Ouvrir le robinet jusqu'à ce que la jauge indique 0.
- 4) Cliquez sur Zéro sur le logiciel.
- 5) Pour toute valeur de pression, lire manuellement le niveau sur la jauge et lire la valeur dans le logiciel. Entrer un facteur d'étalonnage dans les propriétés du logiciel et répéter le processus pour vérifier la précision. Le capteur a un

24bit (0 à 16 millions), les chiffres seront donc très faibles.

### Température :

- 1) Le facteur d'échelle d'entrée est ici de 1.  
Saisissez cette valeur dans les propriétés du logiciel.
- 2) Utilisez le thermocouple manuel et l'appareil de mesure pour vérifier l'exactitude de ces données.

### Pression :

- 1) Commencez par un facteur d'échelle d'entrée faible, par exemple 0,001.
- 2) Ouvrir les vannes jusqu'à ce que la jauge indique 0.
- 3) Cliquez sur Zéro sur le logiciel.
- 4) Pour toute valeur de pression, lire manuellement la pression sur le manomètre et lire la valeur sur le logiciel. Régler le facteur d'étalonnage dans les propriétés du logiciel en fonction du rapport entre la lecture du manomètre et la lecture de la pression du logiciel. Le capteur a une capacité de 24 bits (0 à 16 millions), les chiffres seront donc très petits.
- 5) Répétez l'opération pour vérifier que la pression relevée est exacte.

### Servo Pendulum :

Le codeur a des facteurs d'échelle et d'étalonnage de 1:1 car il s'agit d'un système numérique qui donne à l'utilisateur l'information dont il a besoin.  
lecture en degrés.

### À vous de jouer :

Notez les valeurs du facteur d'échelle et du facteur d'étalonnage du capteur, le cas échéant.

Débit :

SF : \_\_\_\_\_

CF : \_\_\_\_\_

Niveau :

SF : \_\_\_\_\_

CF : \_\_\_\_\_

Température

SF : \_\_\_\_\_

Pression

SF : \_\_\_\_\_

CF : \_\_\_\_\_

Pour chaque système, expérimentez les valeurs de charge afin de comprendre le fonctionnement de chaque système.



# Feuille de travail 3

## Systemes de contrôle ON/OFF



Certains systèmes de contrôle peuvent utiliser efficacement des techniques simples de contrôle tout ou rien. Nous évaluons ici cette technique pour le système Flow.

La photographie montre des vannes et des pompes dans un système de distribution de gaz.

### À vous de jouer :

- 1) Charger l'application ON/OFF. Par exemple : "Open OnOffControl.bat". Il s'agit d'une application qui vous permet de voir les effets d'un simple contrôle par rétroaction sur le système.
- 2) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche.
- 3) Régler la CHARGE à une certaine valeur. Sélectionner une valeur de consigne.
- 4) Appuyez sur RUN et surveillez la sortie.
- 5) Sélectionnez d'autres points de consigne et d'autres pertes et voyez comment la sortie change.
- 6) Prenez des notes et comparez la réussite de l'utilisation de cette technique pour faire fonctionner les différents systèmes.
- 7) Comprendre la propriété Hysteresis et comment elle modifie la sortie.

### Et alors ?

Vous auriez dû faire des observations :

- Il est possible d'utiliser cette technique pour contrôler grossièrement le processus.
- Le résultat n'est en aucun cas "lisse" ou précis.

Il y a une erreur entre le point de consigne et la valeur du processus. Cette erreur est positive

- pour les valeurs faibles et négatif pour les valeurs élevées.
- La fréquence ON/OFF peut varier en fonction du point de consigne.

### Conclusion

Jusqu'à un certain point, cette méthode fonctionne - elle permet certains ajustements de valeur. Mais ce n'est pas satisfaisant et la durée de vie des systèmes d'entraînement peut être réduite par cette méthode.

### Notes sur le pendule asservi

Le moteur est ici puissant et le fait que les données soient échantillonnées à intervalles discrets rend l'information réelle difficile à voir. Pour voir correctement les effets ON/OFF, il peut être nécessaire de réduire la fréquence de contrôle à 20 Hz.

# Fiche de travail 4

## Constante de temps du système



Lors de la conception d'un système PID numérique, nous devons définir certains paramètres de base concernant les délais des mesures dans le système. Cela dépend du temps de réponse du système lui-même.

Photographie d'une centrale hydroélectrique alimentée par des tuyaux

### À vous de jouer :

- 1) Pour le système que vous utilisez, ouvrez l'application Manual. Par exemple : 'Open ONOffControl.bat'.
- 2) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche.
- 3) Ajuster la perte de manière à ce qu'il n'y ait pas de perte dans le système.
- 4) Réglez l'entraînement à environ 50 % de l'échelle.
- 5) Lancer l'application et l'arrêter dès que la sortie atteint le point de consigne.
- 6) Zoomez sur le graphique et mesurez le temps nécessaire à la sortie pour passer de sa position de départ à 63% de son point de consigne.

### Et alors ?

La constante de temps d'un système est le temps nécessaire pour passer de 0 % à 63 % de la variation finale de la sortie. Pour le système Flow, ce temps est très rapide : la pompe est puissante et l'eau est raisonnablement incompressible.

Pour le système de température, c'est assez lent.

Pour les systèmes de contrôle numérique pratiques, l'intervalle entre les échantillons doit être d'environ un dixième de la constante de temps.

Mesurez la constante de temps et calculez les fréquences d'échantillonnage idéales pour chaque système : Débit :

Niveau :

---

---

Température

Pression

---

---

La durée d'échantillonnage de votre système peut faire une grande différence dans son fonctionnement.

# Fiche de travail 4

## Constante de temps

### du système

#### Mesure de la constante de temps d'un système pendulaire asservi

Le moteur du système est très puissant et l'inertie du système est relativement faible. Cela signifie que la constante de temps de ce système est très petite.

La constante de temps avec 6 poids sur le disque sera très différente de celle sans poids. Pour mesurer la constante de temps, cliquez ici :

#### À vous de jouer :

- 1) Charger l'application ON/OFF. Par exemple : "Open OnOffControl.bat". Il s'agit d'une application qui vous permet de voir les effets d'un simple contrôle par rétroaction sur le système.
- 2) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche.
- 3) Régler la CHARGE à une certaine valeur. Sélectionner une valeur de consigne.
- 4) Appuyez sur RUN et surveillez la sortie.
- 5) Sélectionnez d'autres points de consigne et d'autres pertes et voyez comment la sortie change.
- 6) Zoomez sur le graphique et mesurez le temps nécessaire à la sortie pour passer de sa position de départ à 63% de son point de consigne.

#### Et alors ?

Vous constaterez que le système réagit très rapidement. Plus vite que le logiciel ne peut chronométrer avec précision. Vous devrez donc deviner la constante de temps.

#### À vous de jouer :

- 1) Ajoutez 6 poids et répétez le processus.
- 2) Mesurez le temps de montée et calculez la constante de temps.

#### Et alors ?

Même avec 6 poids, le système réagit rapidement. Vous devrez faire une estimation de la constante de temps. N'oubliez pas que le système est numérique et que le temps de montée peut être mesuré à partir du moment où le point de consigne augmente.

# Fiche de travail 5

## Contrôleur P



Il existe une bien meilleure façon de contrôler les systèmes que le simple contrôle marche/arrêt : le contrôle proportionnel, qui consiste à faire varier la puissance fournie au processus en fonction de la différence entre la sortie souhaitée et le débit réel. Dans cette feuille de travail, vous explorerez la création d'un régulateur proportionnel pour les systèmes basés sur le débit.

La photographie montre une pompe à eau dans une usine.

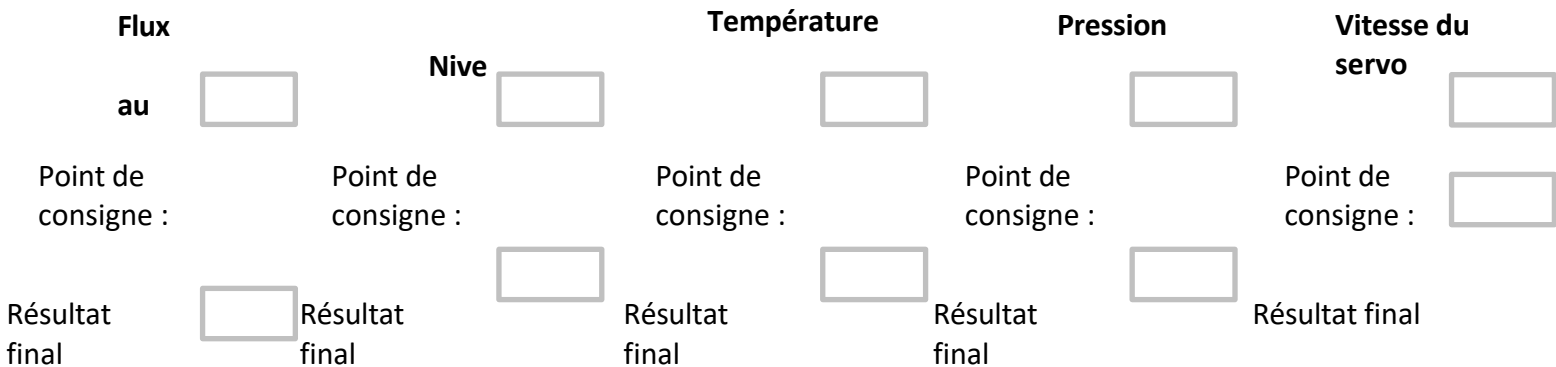
### À vous de jouer :

- 1) Charger l'application PID. Par exemple : "Open PIDControl.bat".
- 2) Reportez-vous au document de référence et assurez-vous que vous êtes familiarisé avec le fonctionnement du logiciel.
- 3) Dans la section Propriétés, désactivez le filtre intégral. Désactivez le filtre dérivé. Vous utiliserez plus tard.
- 4) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle de sortie que vous avez calculé précédemment.
- 5) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle du capteur que vous avez mesurées précédemment.
- 6) Dans la section des propriétés, entrez le facteur d'étalonnage que vous avez mesuré précédemment - s'il est nécessaire.
- 7) Dans la section Propriétés, saisissez une fréquence de contrôle appropriée en fonction de la constante de temps du système.
- 8) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche et vérifiez que votre ordinateur communique avec l'unité et que les DEL d'application et de communication sont vertes.
- 9) Régler la quantité de charge de manière à ce qu'il y ait une perte dans le système.
- 10) Ce logiciel est un contrôleur PID complet. Pour l'instant, nous allons nous concentrer sur le terme P. Réduisez d'abord Ki et Kd à 0, ce qui les élimine de notre équation. Réduisez d'abord Ki et Kd à 0, ce qui les élimine de notre équation, et sélectionnez une valeur de départ de Kp égale à 1. Sur l'écran, vous pouvez voir l'équation de contrôle avec les termes P, I et D.
- 11) Sélectionnez RUN.
- 12) Déplacez le point de consigne vers la moitié de l'échelle.
- 13) Lorsque la valeur se stabilise, noter le point de consigne et la valeur de sortie pour chaque système.

### Et alors ?

Vous venez d'observer un simple contrôleur proportionnel en action. Le logiciel prend la valeur du processus et en soustrait le point de consigne pour obtenir une valeur d'erreur. Il applique ensuite le multiplicateur Proportionnel P à cette valeur, puis le multiplicateur Scaling Factor (et calcule la valeur de l'erreur). Le cas échéant, la modulation de la largeur d'impulsion de la pompe est réglée à cette valeur, puis l'entraînement de la pompe à cette valeur. Ceci peut être exprimé mathématiquement comme suit :

$$\text{Erreur} = \text{Point de consigne} - \text{Valeur du processus}$$



PWM % = Facteur d'échelle x Facteur proportionnel x Erreur

Très souvent, les ingénieurs l'expriment différemment :

$$O(t) = K_f \times K_p \times e(t)$$

Où ?

O(t) indique PWM comme la lettre "O" et le "(t)" indique qu'il varie dans le temps.

K<sub>f</sub> est le facteur d'échelle pour l'entraînement PWM.

K<sub>p</sub> est la valeur du multiplicateur proportionnel

e(t) est l'erreur et, une fois de plus, le "(t)" implique qu'elle varie dans le temps.

$$O(t) = K_f \times K_p \times e(t)$$

Fonction de contrôle

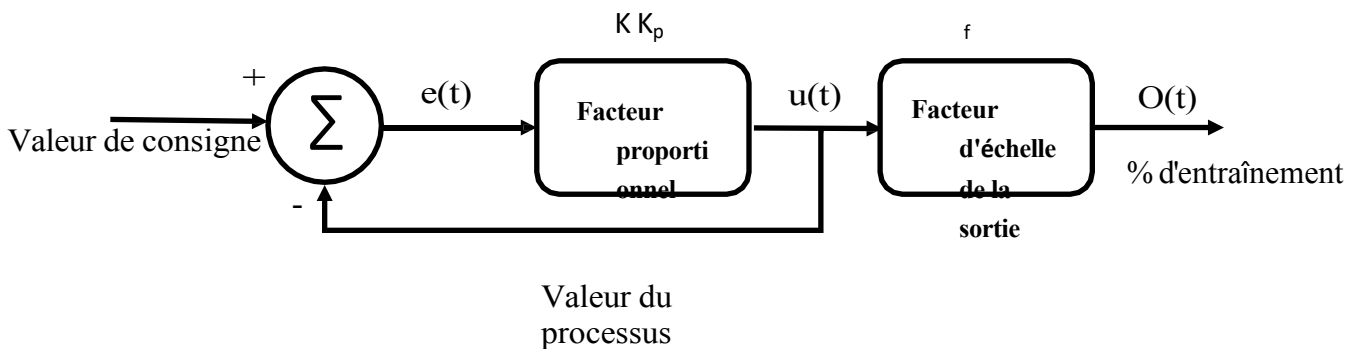


Schéma fonctionnel

### Et alors ?

Le système que nous avons créé peut être exprimé sous la forme d'une équation mathématique. C'est ce que l'on appelle parfois la fonction de contrôle.

Ceci est également parfois exprimé sous forme de diagramme. Ce diagramme est illustré ci-dessus et est connu sous le nom de diagramme de blocs.

Le schéma fonctionnel montre le flux des signaux dans un système et il est utilisé par les ingénieurs comme moyen abrégé d'expliquer le flux des signaux et les processus mathématiques dans le système.

Dans le schéma fonctionnel, la lettre grecque Epsilon ( $\Sigma$ ) dans le cercle signifie que les signaux entrants sont additionnés. Les signes "+" et "-" indiquent si la valeur ou l'équivalent négatif de la valeur est additionné. Les cases rectangulaires indiquent les multiplications des signaux.

Lorsque l'on parle de systèmes de contrôle, on s'intéresse souvent autant à la partie mathématique du problème qu'à la mécanique des systèmes de contrôle.

la conversion du résultat mathématique en un signal de commande et cette partie du problème n'est pas prise en compte dans les mathématiques. Cela signifie que le système ci-dessus est le plus souvent décrit mathématiquement comme ceci :

$$u(t) = K_p \times e(t)$$

Le principal problème des contrôleurs uniquement proportionnels est que l'erreur n'est jamais nulle : si c'était le cas, l'entraînement de sortie serait égal à 0 et le processus s'arrêterait.

Le pseudocode nécessaire à la mise en place d'un tel système est présenté ci-dessous :

$$PWM\_out = \text{Facteur d'échelle} \times K_p \times \text{erreur}$$

### À vous de jouer :

Vous devez vous familiariser avec ce système, les différentes valeurs de  $K_p$  et la manière dont la valeur choisie affecte les performances du système.

- 1) Régler le système de manière à ce que le point de consigne corresponde à 50 % de la pleine échelle.
- 2) Une fois que le système s'est stabilisé, régler le point de consigne à 75 % de la pleine échelle.
- 3) Ajustez-le ensuite à nouveau à 50 %.
- 4) Débit, niveau, température, pression : répéter cette opération pour des valeurs de  $K_p$  (valeur proportionnelle) de 1, 2, 3, 4 et esquissez les résultats ci-dessous pour chacune des valeurs suivantes : température, pression, niveau, débit et vitesse de la servocommande.

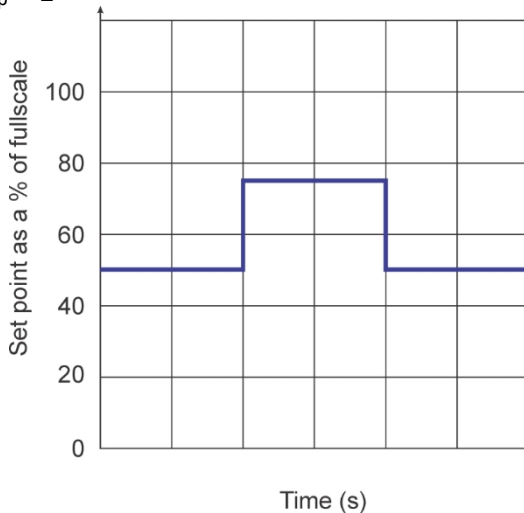
- 4) Pour chacun des points de consigne élevés, notez la valeur finale réglée.

### Et alors ?

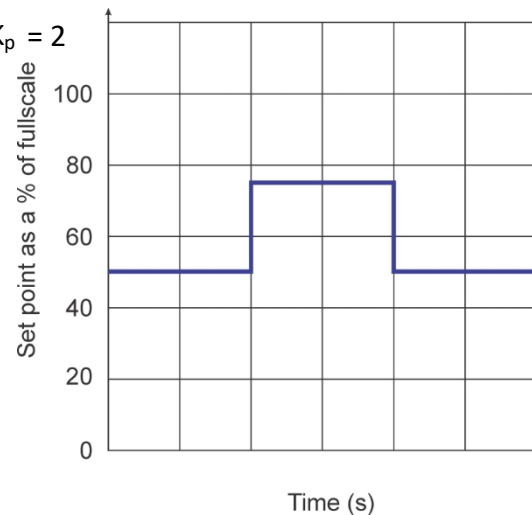
Vous devriez voir qu'il y a toujours un offset dans un contrôleur P only. L'offset est déterminé par la valeur de  $K_p$  : plus la valeur de  $K_p$  est élevée, plus l'offset est important.

Des valeurs plus élevées de  $K_p$  entraînent également une plus grande instabilité.

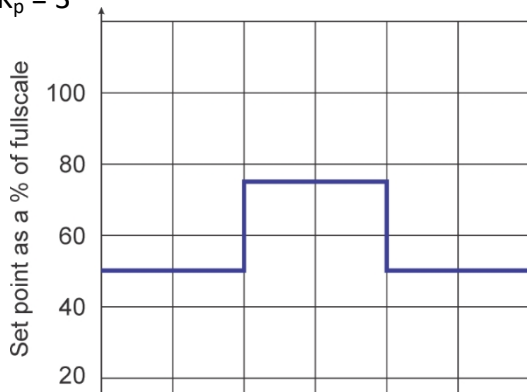
$K_p = 1$



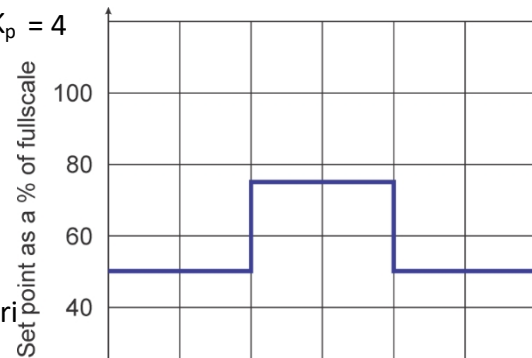
$K_p = 2$



$K_p = 3$



$K_p = 4$





Le problème du régulateur P seul est qu'il faut toujours un décalage. Ce problème peut être résolu en ajoutant un terme intégral qui corrige l'erreur de sortie à long terme.

La photo montre des pompes dans une chaufferie.

### À vous de jouer :

- 1) Charger l'application PID : "Open PIDControl.bat".
- 2) Reportez-vous au document de référence et assurez-vous que vous êtes familiarisé avec le fonctionnement du logiciel.
- 3) Dans la section Propriétés, désactivez le filtre intégral. Désactivez le filtre dérivé. Vous les utiliserez plus tard.
- 4) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle de sortie que vous avez calculé précédemment.
- 5) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle de Sensor que vous avez calculées précédemment.
- 6) Dans la section des propriétés, entrez le facteur d'étalonnage que vous avez calculé précédemment - s'il est nécessaire.
- 7) Dans la section Propriétés, entrez une fréquence de contrôle appropriée en fonction de la constante de temps du système.
- 8) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche et vérifiez que votre ordinateur communique avec l'unité et que les voyants Application et Communications sont verts.
- 9) Débit, niveau, température, pression : Modifier  $K_p$  à 1 et  $K_i$  à environ 10.
- 9) Vitesse du servo : Ajuster  $K_p$  à 1 et  $K_i$  à environ 0,1.
- 10) Sélectionnez RUN.
- 11) Comme précédemment, déplacez le point de consigne entre 50% de la pleine échelle et 75% de la pleine échelle.
- 12) Pour différentes valeurs de  $K_p$  et  $K_i$ , notez les performances du système sur les petits graphiques de la page suivante.



# Fiche de travail 6

## Contrôleur PI



FLTP :

$$K_p = 1$$

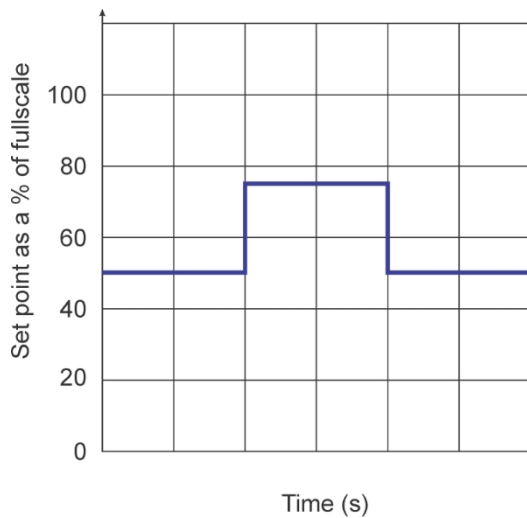
$$K_i = 20$$

Servo

$$K_p =$$

$$1$$

$$K_i = 0,1$$



FLTP :

$$K_p = 1$$

$$K_i = 20$$

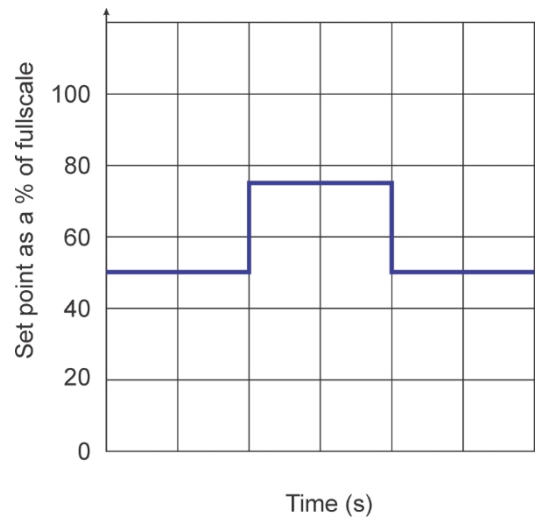
Servo

$$K_p =$$

$$1$$

$$K_i =$$

$$0,06$$



FLTP :

$$K_p = 1$$

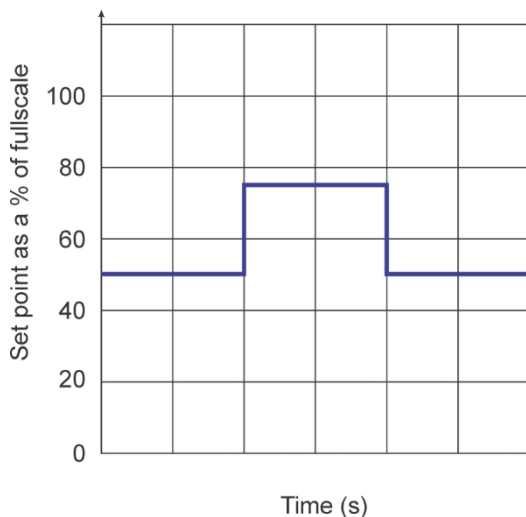
$$K_i = 30$$

Servo

$$K_p =$$

$$1$$

$$K_i = 0,04$$



FLTP :

$$K_p = 0,7$$

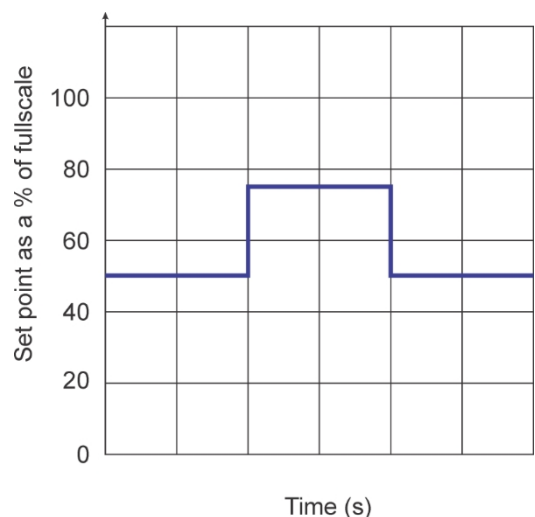
$$K_i = 40$$

Servo

$$K_p =$$

$$1$$

$$K_i = 0,02$$



### Et alors ?

Vous venez d'observer un simple contrôleur proportionnel intégral (PI) en action. Il reprend le contrôleur P seul de la feuille de calcul précédente et ajoute un terme supplémentaire au système. L'avantage du régulateur PI est qu'il ramène l'erreur dans le système à un niveau proche de zéro, ce qui résout le principal problème du régulateur proportionnel seul. Le contrôleur PI prend également en compte l'historique du système en termes d'augmentation de l'entraînement de la pompe si celle-ci n'a pas l'effet désiré.

Le terme intégral applique une correction au système qui n'est pas seulement proportionnelle à l'erreur, mais aussi à l'erreur.

est également proportionnelle à la durée de l'erreur : plus l'erreur persiste, plus l'effet est important.

En pratique, on procède à une intégration : pour un temps donné, on additionne l'erreur multipliée par le temps pendant lequel l'erreur a persisté et on multiplie le résultat par un nouveau facteur :  $K_i$

Mathématiquement, cela s'exprime comme suit :

$$K_I \int_0^t e(t) dt$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt$$

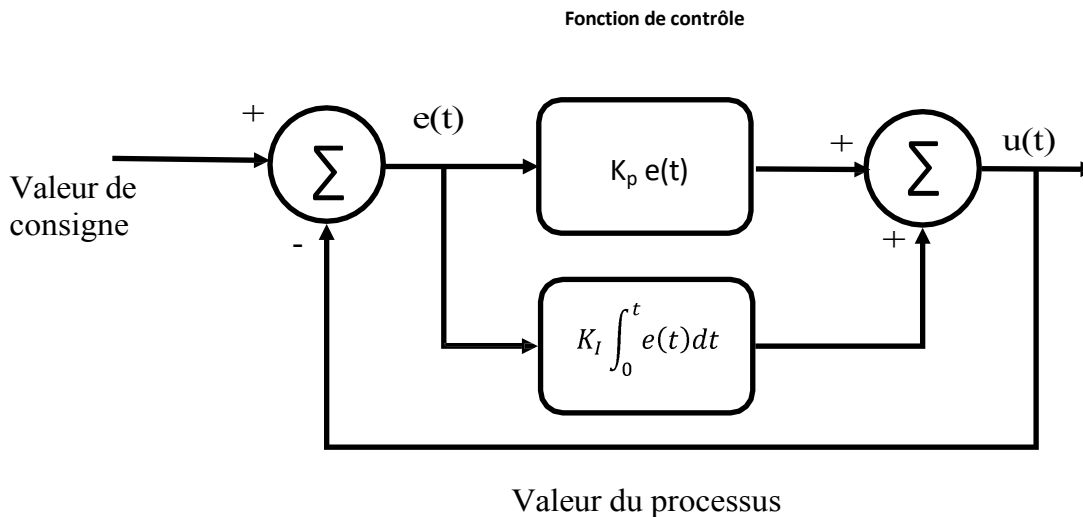


Schéma fonctionnel

Mathématiquement, la fonction de contrôle globale a changé, comme vous pouvez le voir ci-dessus - elle comporte désormais un terme intégral.

Le schéma fonctionnel a également changé : l'erreur est introduite dans deux processus, l'un pour le terme proportionnel et l'autre pour le terme intégral. Ils sont additionnés pour donner une fonction de sortie qui est introduite dans le processus d'entraînement PWM. Notez que pour plus de clarté, nous laissons le processus PWM en dehors du bloc.

diagramme.

En utilisant le pseudocode, nous pouvons simplement développer un programme pour réaliser cette opération, comme indiqué ci-dessous.

Le problème du régulateur PI est qu'il y a un dépassement - la valeur de sortie est supérieure au point de consigne pendant un certain temps. Pour certains systèmes, c'est une bonne chose, pour d'autres, ce n'est pas le cas.

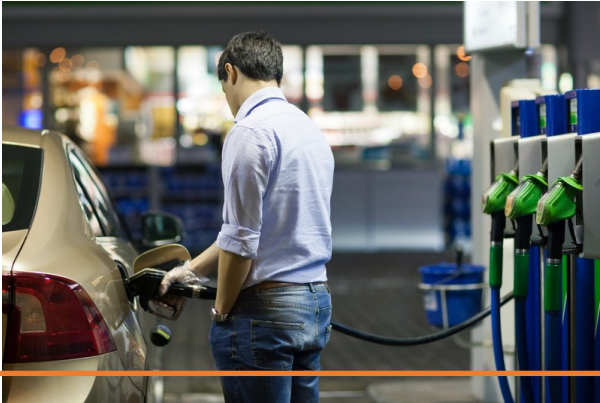
```

Erreur précédente = Erreur
Erreur = Valeur_du_processus - Valeur_du_fixe
Intégrale = Intégrale + erreur
PWM_out = Facteur d'échelle x (Kp x erreur + Ki x Intégrale)

```

# Fiche de travail 7

## Contrôleur PID



Dans certaines situations, il est nécessaire de contrôler une pompe pour qu'elle délivre rapidement la quantité de liquide requise sans dépassement. C'est le cas par exemple d'une pompe à essence prépayée. Le système PI ne répond pas aux exigences dans ce cas, mais l'ajout d'un terme différentiel peut aider.

### À vous de jouer :

- 1) Charger l'application PID : "Open PIDControl.bat".
- 2) Reportez-vous au document de référence et assurez-vous que vous êtes familiarisé avec le fonctionnement du logiciel.
- 3) Dans la section Propriétés, désactivez le filtre intégral. Désactivez le filtre dérivé. Vous les utiliserez plus tard.
- 4) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle de sortie que vous avez calculé précédemment.
- 5) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle de Sensor que vous avez calculées précédemment.
- 6) Dans la section Propriétés, entrez une fréquence de contrôle appropriée en fonction de la constante de temps du système.
- 7) Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche et vérifiez que votre ordinateur communique avec l'unité et que les voyants Application et Communications sont verts.
- 8) Modifier la valeur de  $K_p$  à 1,  $K_i$  à 20 et  $K_d$  à 0,02.
- 9) Sélectionnez RUN.

Comme précédemment, déplacez le point de consigne entre 50 % et 100 %.

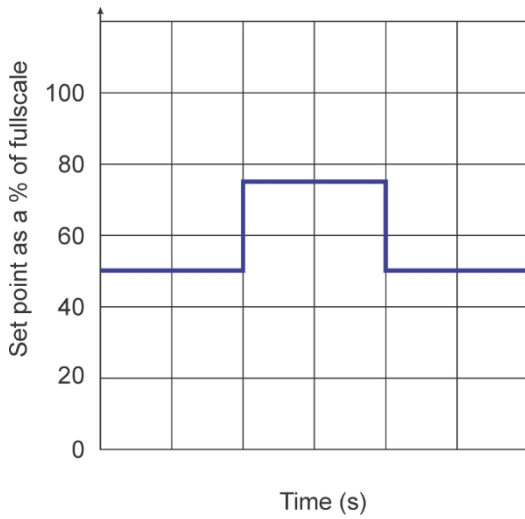
- 1) de la pleine échelle et 75% de la pleine échelle.
- 2) Pour différentes valeurs de  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$ , notez les performances du système sur les petits graphiques de la page suivante.

# Fiche de travail 7

## Contrôleur PID

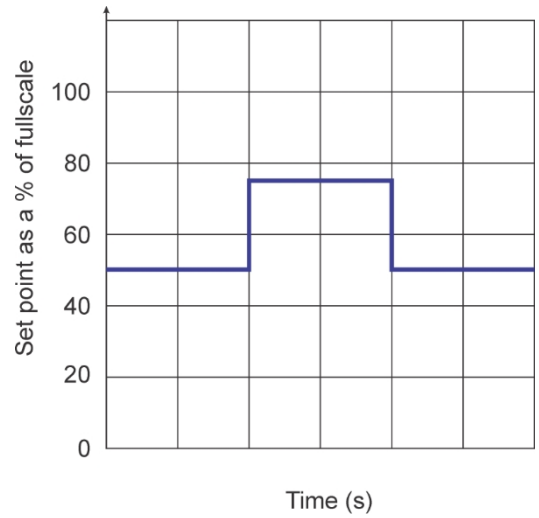


FLTP :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 20$   
 $K_d = 0,02$



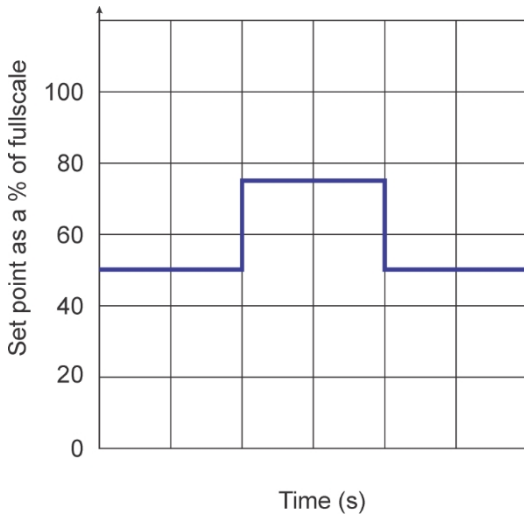
Servo :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 0,5$   
 $K_d = 1$

FLTP :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 20$   
 $K_d = 0,04$



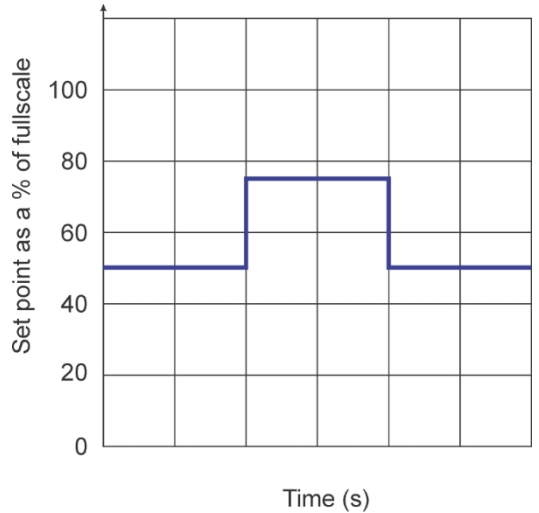
Servo :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 0,5$   
 $K_d = 2$

FLTP :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 20$   
 $K_d = 0,06$



Servo :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 0,5$   
 $K_d = 3$

FLTP :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 20$   
 $K_d = 0,08$



Servo :  
 $K_p = 1$   
 $K_i = 0,5$   
 $K_d = 4$

### Et alors ?

Vous venez d'assister à l'action d'un régulateur PID (Proportional Integral Differential). Ce régulateur reprend le contrôleur PI de la feuille de calcul précédente et ajoute un terme supplémentaire au système.

Le problème avec un contrôleur PI uniquement est que le système ne prend pas en compte le taux de variation de l'erreur du système. Si l'erreur diminue rapidement, nous pourrions vouloir ralentir un peu la pompe. Le terme dérivé applique une correction au système qui est proportionnelle au taux de variation de l'erreur.

changement d'erreur.

Dans la pratique, on utilise un terme de différenciation dans l'équation.

Mathématiquement, cela s'exprime comme suit :

$$K_D \frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Fonction de contrôle

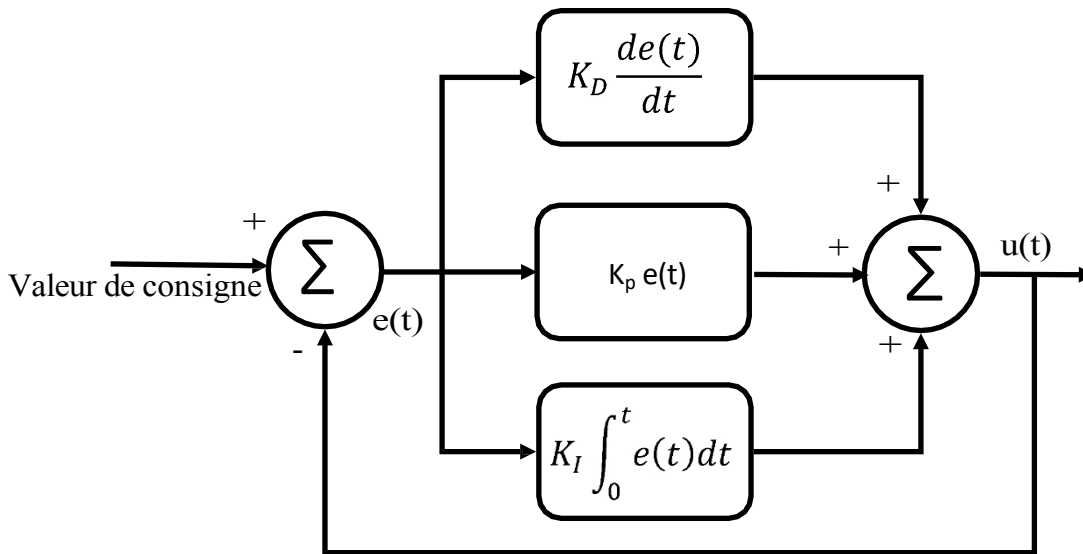


Schéma fonctionnel

Mathématiquement, la fonction de contrôle a changé comme vous pouvez le voir ci-dessus - elle contient maintenant un terme dérivé.

Il suffit de développer un programme pour y parvenir, comme indiqué ci-dessous.

Le schéma fonctionnel a également changé : l'erreur est introduite dans deux processus, l'un pour le terme proportionnel et l'autre pour le terme intégral. Ils sont additionnés pour obtenir une fonction de sortie qui est transmise au processus d'entraînement PWM.

### Et alors ?

Vous avez maintenant une idée des effets de chacun des termes de P, I et D. Mais comment calculer les valeurs dont nous avons besoin ?

De manière programmatique, en utilisant le pseudocode, nous pouvons

```

Erreur précédente = Erreur
Erreur = Valeur_du_processus -
Valeur_définie
Intégrale =
Intégrale + erreur
Différentielle
= erreur - dernière erreur
    
```

```
PWM_out = Facteur d'échelle x (Kp x erreur + Ki x Intégrale + Kd x Différentielle)
```

# Fiche de travail 7

## Contrôleur PID



$$U(s) = \left( Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \right) E(s)$$

La fonction de contrôle peut être réécrite comme indiqué ci-dessus pour former une fonction de transfert. Dans la fonction de transfert, l'intégrale s'écrit  $1/s$  et le terme différentiel s'écrit  $s$ . L'explication de cette fonction dépasse le cadre de ces feuilles de travail, mais il existe de nombreuses références à ce sujet sur Internet.

Dans un système numérique, les termes de  $s$  sont convertis en termes numériques échantillonnés, généralement représentés par un "Z". Ici, les valeurs numériques successives de l'erreur sont écrites comme suit :

$E^Z$  erreur de courant

$E^{(Z-1)}$  previous error 1 sample time

ago  $E^{(Z-2)}$  error 2 sample time periods ago

$E^{(Z-3)}$  error 3 sample time periods ago

Etc.

Le terme différentiel est réécrit sous la forme  $Kd \cdot (erreur\ actuelle - erreur\ précédente)$

Ou, plus mathématiquement, comme suit

$$Kd \cdot (E^Z - E^{(Z-1)})$$

Le terme intégral est réécrit comme suit

Intégrale = intégrale + erreur

Ou, plus mathématiquement, comme suit

$$Ki \cdot \sum ( E^Z + E^{(Z-1)} + E^{(Z-2)} + E^{(Z-3)} + \dots + E^{(Z-n)})$$

Lorsque les termes sont limités à  $n$  échantillons - ou la somme de toutes les erreurs depuis la mise en marche.

La fonction de transfert peut donc être réécrite comme suit :

$$U(Z) = Kp \cdot E^Z + Ki \cdot \sum ( E^Z + E^{(Z-1)} + E^{(Z-2)} + E^{(Z-3)} + \dots + E^{(Z-n)}) + Kd \cdot (E^Z - E^{(Z-1)})$$

### À vous de jouer :

- Vérifiez que les exemples de codage correspondent à ces nouvelles définitions des termes intégraux et différentiels
- Discutez de l'effet du temps d'échantillonnage sur les valeurs d'un système.

# Fiche de travail 8

## Algorithme de Zeigler Nichols



Type de contrôle	$K_P$	$K_I$	$K_D$
PID classique	0.6 $K_u$	1,2 $K_u/T_u$	0,075 $K_u T_u$
P	0,5 $K_u$		
PI	0,45 $K_u$	0,54 $K_u/T_u$	
PD	0,8 $K_u$		0,1 $K_u T_u$
Quelques dépassements	$K_u/3$	(2/3) $K_u/T_u$	(1/9) $K_u/T_u$
Pas de tir excessif	0,2 $K_u$	(2/5) $K_u/T_u$	(1/15) $K_u/T_u$

Vous devriez maintenant avoir une idée de la façon dont  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  et leurs valeurs affectent les performances d'un système. Mais quelles sont les bonnes valeurs ? L'algorithme de Zeigler Nichols vous aide à définir des valeurs pour différents systèmes de contrôle.

### À vous de jouer :

Vous devez d'abord rassembler quelques informations sur votre système. Pour ce faire, vous devez

- 1) Avec les mêmes réglages que dans l'expérience précédente, régler  $K_p$  à 1,  $K_i$  à 0,  $K_d$  à 0.
- 2) Appuyez sur la touche RUN.
- 3) Augmentez lentement P jusqu'à un point de "stabilité neutre" : il s'agit de la valeur à laquelle la sortie commence à osciller de manière prévisible et stable. C'est le gain critique ou ultime et nous le définissons comme " $K_U$ ".
- 4) Arrêtez le système en cliquant sur le bouton d'arrêt lorsque vous avez recueilli un certain nombre de cycles d'"instabilité stable".
- 5) Cliquez sur la zone du graphique. Utilisez la molette de la souris pour agrandir le graphique. Mesurez le temps entre les pics d'instabilité. Il s'agit de la période de stabilité neutre ou  $T_U$ .

### Et alors ?

Ziegler et Nichols étaient des ingénieurs célèbres dans les années 1940 qui ont fait beaucoup de recherches sur les systèmes de contrôle. Ils ont mis au point une méthode d'approximation de la solution au problème de la sélection des valeurs de P, I et D pour les systèmes de contrôle en fonction de leur comportement en termes de  $K_U$  et  $T_U$ .

Ce tableau est présenté ci-dessous.

### À vous de jouer :

En utilisant une feuille de calcul et les valeurs de  $K_U$  et  $T_U$ , vous avez calculé les valeurs de  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  pour les différents types de systèmes de contrôle présentés dans le tableau.

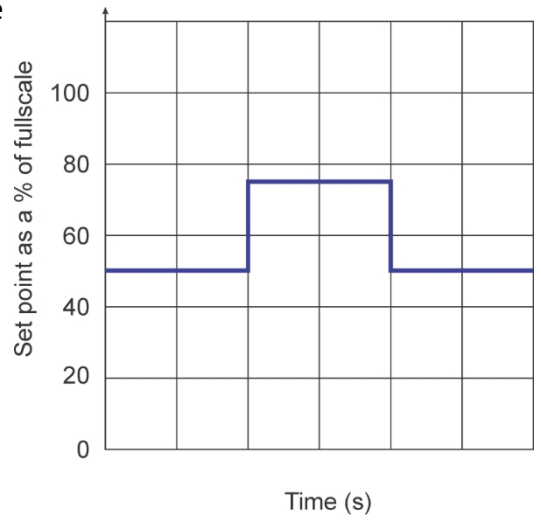
Comme il s'agit d'un système discret, vous devrez di- viser la valeur de  $K_i$  par la fréquence de l'échantillon et vous devrez multiplier la valeur de  $K_d$  par la fréquence de l'échantillon pour obtenir les valeurs que vous recherchez. besoin.

Très le point de consigne entre 50% et 75% (plus bas pour l'appareil de température) de la pleine échelle comme précédemment et vérifiez que cela fonctionne pour le débit. pour le système PID classique.

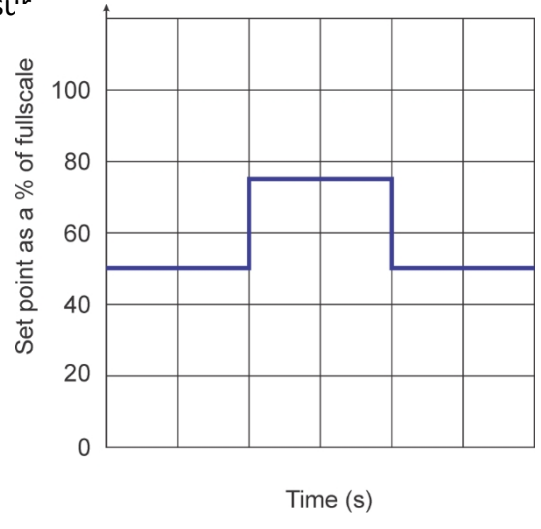
Pour le pendule asservi, vous constaterez que le système est très bruyant : il ne fonctionnera pas sans un filtre dérivé. Utilisez 6 poids et calculez Zeigler Nichols comme ci-dessus.



PID classique



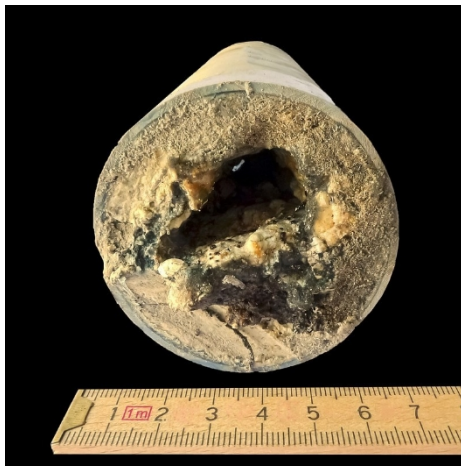
Pas de sur-tirer





# Feuille de travail 9

## Remontée intégrale



Comme vous l'avez vu, un système de contrôle PID bien réglé constitue une excellente solution. Si tout fonctionne parfaitement dans votre système, cela fonctionne très bien. Dans la pratique, il y a quelques problèmes du "monde réel" que nous devons parfois régler avant que le système ne soit adapté à l'usage prévu.

La photo montre une canalisation partiellement bouchée.

### À vous de jouer :

- 1) Réglez le système avec les valeurs classiques du PID pour  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  que vous avez déduites des calculs de Ziegler Nichols dans la feuille de travail précédente.
  - 2) Choisissez un lecteur et une charge adaptés à votre système.
  - 3) Faites fonctionner le système et remarquez comment le terme intégral apparaît sur votre graphique : la ligne jaune.
  - 4) Arrêtez le système pour qu'il n'atteigne pas le point de consigne et voyez comment la valeur intégrale s'accumule. Pour ce faire, procédez comme suit
- Pression - utiliser la vanne manuelle pour faire fuir l'air à un niveau donné taux plus élevé.
  - Température : utiliser un sèche-cheveux pour refroidir le système.
  - Flux : serrez l'un des tubes avec vos ailettes.
  - Niveau : serrer le tube avec les doigts
  - Pendule asservi : arrêter le mouvement avec les doigts.

### Et alors ?

Pour certains systèmes, le terme intégral s'accumule à un point tel qu'il augmente de manière significative le temps nécessaire au système pour se stabiliser. Un défaut dans le système, tel qu'un tuyau obstrué ou un câble mal fixé, peut entraîner une perte de temps

une valeur accumulée très importante pour la composante intégrale, qui peut prendre un certain temps à s'effacer. C'est ce qu'on appelle la remontée intégrale. Pour cette raison, de nombreux systèmes introduisent une variation dans le contrôleur qui limite la valeur de la composante intégrale. C'est ce que l'on appelle le bridage de l'intégrale, car l'intégrale est bridée à une valeur que l'on peut fixer.

### À vous de jouer :

- 1) Le logiciel dispose d'une fonction dans le tableau des propriétés qui vous permet de fixer la valeur de l'intégrale. Sélectionnez 'Integral clamp' pour OUI .
- 2) Répétez les étapes 1 à 3 et comparez les résultats lorsque le système a été débridé. Faites des captures d'écran ou exportez les données vers Excel et comparez les deux séries d'informations.
- 3) Pour le système que vous utilisez, la pince intégrale produit-elle un meilleur système de contrôle ?

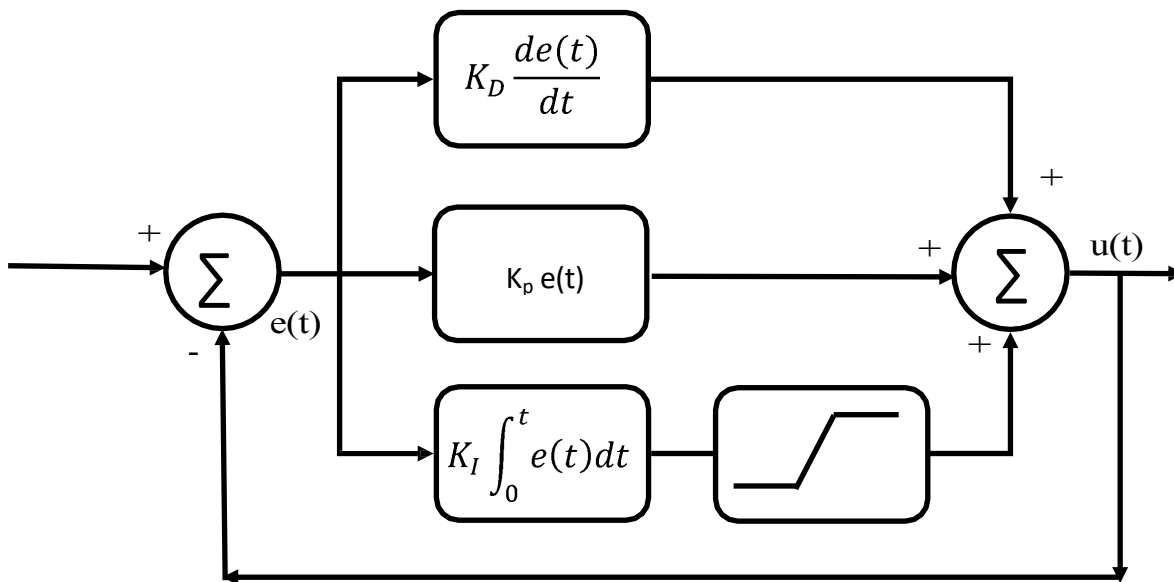
### Et alors ?

La pince intégrale permet aux concepteurs de systèmes de tenir compte des problèmes dans le processus de contrôle qui pourraient affecter les performances du système. S'il y a un problème dans le système et que la valeur intégrale est autorisée à augmenter jusqu'à n'importe quelle valeur, il faudra beaucoup de temps pour que le système revienne à son état opérationnel une fois le problème résolu. En limitant la valeur du terme intégral, on peut

supposer que le système soit rendu plus robuste.

Cela nécessite l'ajout d'un terme supplémentaire à notre schéma fonctionnel, que vous pouvez voir ci-dessous

Vous pouvez également voir comment cela serait mis en œuvre dans le code.



```

Erreur précédente = Erreur
Erreur = Valeur_du_processus -
Valeur_définie
Intégrale = Intégrale +
erreur
Si Integral = Max_Clamp_Value
    Integral = Max_Clamp_Value
FinIf
Si Integral < Min_Clamp_Value
    Integral = Min_Clamp_Value
FinIf
    
```

# Feuille de travail 10

## Filtre dérivatif



Le bruit est un problème clé de certains systèmes de contrôle. S'il y a du bruit sur le chemin du système, la composante différentielle peut introduire de grandes quantités de rétroaction qui amplifient les termes du bruit. Ce problème est si grave dans les cas suivants

Dans certains systèmes, le contrôle PID n'est pas possible : nous avons besoin de

un mécanisme permettant de limiter les effets du bruit.

La photographie montre une station de pompage éloignée au Canada.

### À vous de jouer :

- 1) Réglez le système avec les valeurs classiques du PID pour  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  que vous avez déduites des calculs de Zeigler Nichols dans la feuille de travail précédente.
- 2) Choisissez un lecteur et une charge adaptés à votre système.
- 3) Faites fonctionner le système et regardez le terme dérivé sur votre graphique - la ligne bleue.

### Et alors ?

Certains systèmes sont bruyants et d'autres non. Le terme dérivé est problématique dans les systèmes de contrôle car il amplifie tout bruit présent dans le système. Souvent, ce bruit est dû à la nature de l'échantillonnage dans un système numérique. Les termes différentiels sont généralement les termes les plus problématiques dans les systèmes PID et c'est la raison pour laquelle un grand nombre de systèmes sont simplement des contrôleurs PI qui ne tiennent pas compte du terme différentiel.

Cependant, avec quelques ajustements, il est possible d'améliorer le différentiel.

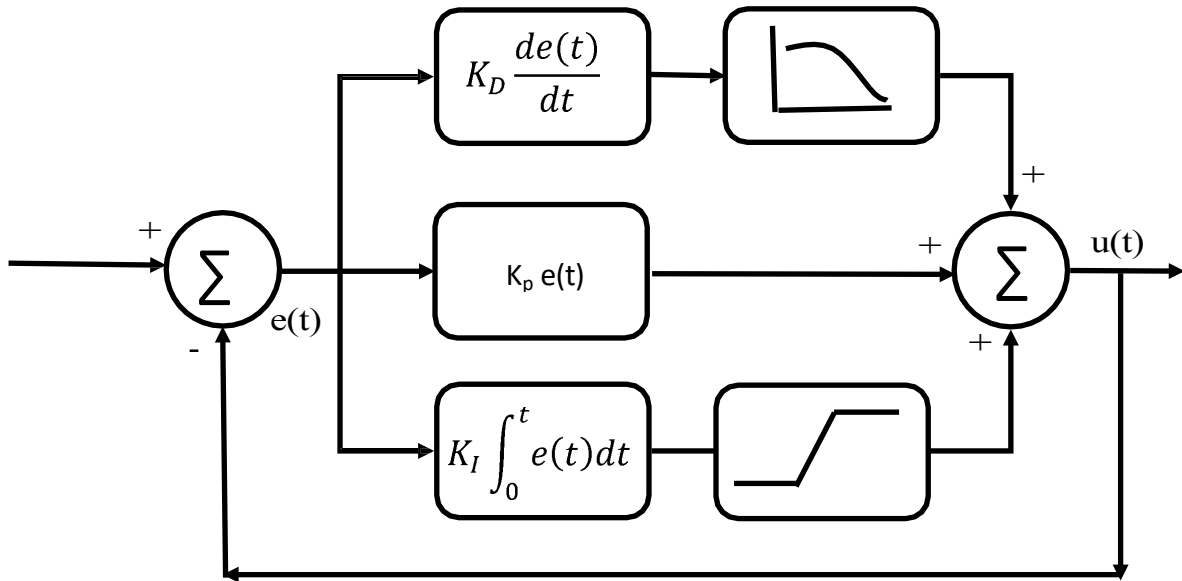
### À vous de jouer :

- 1) Dans la section des propriétés, réglez le terme du filtre dérivé sur OUI.
- 2) Réglez le terme du filtre dérivatif sur 10.
- 2) Pour le système que vous utilisez, le filtre dérivé produit-il un meilleur système de contrôle ?

### Et alors ?

Un petit filtre passe-bas ajouté au système modifie la fréquence des signaux qui sont renvoyés au signal d'erreur. Cela rend le système beaucoup plus stable et réduit le bruit dans le système.

Vous pouvez voir comment cela affecte le diagramme de Bode ci-dessous. Vous pouvez voir comment cela est mis en œuvre dans le code ci-dessous.



//Le CDF est le coefficient de filtrage dérivé.

sortie = dernière\_sortie + DFC (sortie - dernière\_sortie)  
 Différentielterm =  $K_D \cdot \text{sortie}$   
 Dernière sortie = sortie



La plupart du temps, les calculs de la "règle empirique" de Zeigler Nichols peuvent nous donner de bonnes approximations pour obtenir un système stable en utilisant le contrôle P, I et D. ZN inclut également des valeurs pour "l'absence de dépassement". Dans la pratique, cela ne fonctionne pas toujours pour les systèmes de contrôle.

### À vous de jouer :

Calculer les valeurs de Ziegler Nichols pour l'absence de dépassement et les introduire dans le système.

Sur certains systèmes, les valeurs ZN pour "pas de dépassement" ne produisent pas les résultats souhaités. Ajuster manuellement les valeurs de  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  pour obtenir un résultat typique sans dépassement.

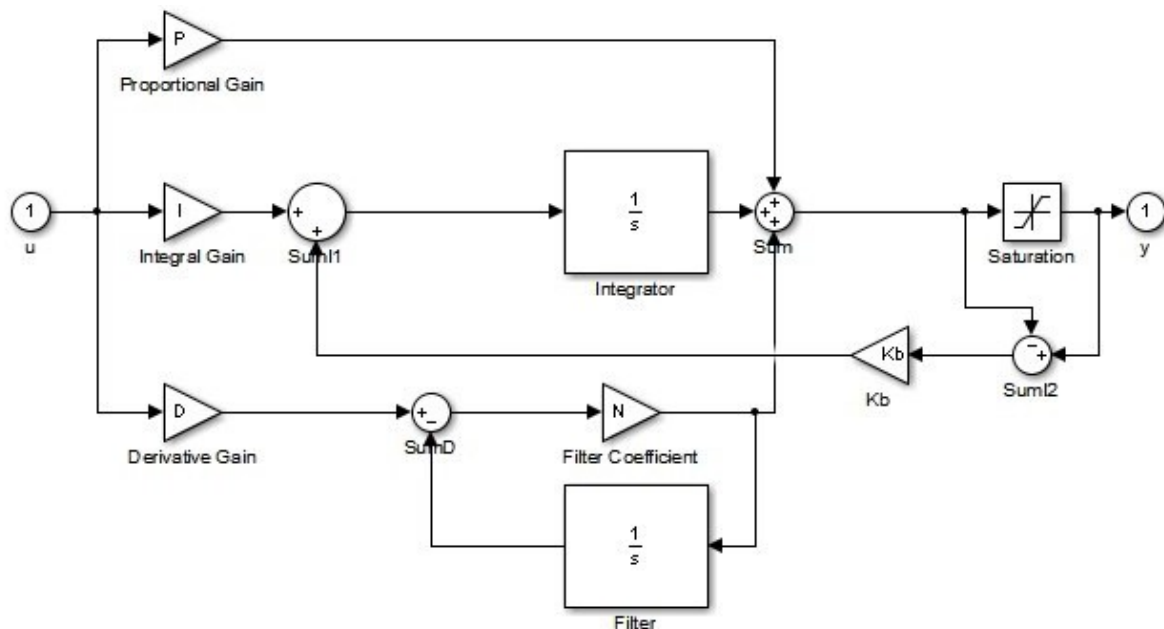
Notez vos résultats. Décrivez comment les valeurs croissantes et décroissantes de  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  affectent les performances du système.

# Interfaçage avec MATLAB/LabView



Les feuilles de travail ci-dessus utilisent un logiciel standard qui contrôle le système. C'est une bonne chose pour les systèmes simples. En pratique, si vous êtes un ingénieur concepteur, vous devrez peut-être concevoir un logiciel de contrôle à partir de zéro en comprenant la fonction de transfert du système de contrôle.

La photo montre un ingénieur concepteur dans un laboratoire...



- 1) Familiarisez-vous avec le contenu du guide de référence sur le contrôle des processus.
- 2) Familiarisez-vous avec la liste des commandes API dans le guide de référence.
- 3) Construisez un programme Matlab/Labview qui met simplement le variateur en marche et lit la valeur de retour du capteur.
- 4) Lisez les fiches de travail 1 à 6. Reproduisez ces fonctions dans Matlab / Labview afin de comprendre le facteur d'échelle de la pompe, l'étalonnage du capteur de débit et le fonctionnement de la vanne.
- 5) En utilisant vos connaissances de Laplace, construisez un modèle de plan S pour le système PID décrit par le schéma fonctionnel de la feuille de travail 9.
- 6) Modifiez votre programme pour mettre en œuvre le serrage intégral et le filtrage dérivé.

# Feuille de travail 13

## Pendule asservi - contrôle de l'angle



Avec un variateur H standard, il est possible d'utiliser 4 transistors FET comme suit des interrupteurs pour contrôler le sens du courant dans un moteur. Cette configuration est très différente des systèmes de température, de pression, de débit et de niveau qui ont un moteur ou une pompe qui ne fonctionne que dans un sens. Dans ce cas, Ziegler Nichols ne s'applique pas et vous devrez régler manuellement le système en fonction de votre compréhension des effets de  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$ .

En ajoutant un seul poids au disque du rotor, vous pouvez créer un pendule. Dans ce cas, nous nous intéressons au contrôle de l'angle du rotor : le problème est similaire à celui d'un transporteur personnel auto-équilibré comme celui de la photo ci-dessus.

### À vous de jouer :

- 1) Régler le système de manière à ce qu'il n'y ait qu'un seul poids à 0 degré.
- 2) Charger l'application PID : "Open PIDControl.bat".
- 3) Dans la section Propriétés, désactivez le filtre intégral. Désactivez le filtre dérivatif.
- 4) Dans la section Propriétés, entrez les valeurs du facteur d'échelle de sortie que vous avez calculé précédemment.
- 5) Fixer  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ .
- 6) Dans la section Propriétés, entrez une fréquence de contrôle de 1000 Hz. Appuyez sur le bouton GO dans le coin supérieur gauche.
- 7) Tenez le disque de manière à ce que le poids soit au point mort haut et cliquez sur le bouton ZERO.
- 8) Appuyer sur RUN
- 9) Expérimentez les valeurs de  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  pour voir comment elles affectent le système. Pour une personne typique...  
al transporter comme vous pouvez le voir sur la photo quels réglages choisiriez-vous et pourquoi ?
- 10) Le terme " $K_i$ " est-il nécessaire ?

# Guide de l'instructeur



## A propos de ce cours

### Introduction

Le cours est essentiellement pratique. Dans la mesure du possible, les implications pratiques et les applications de la théorie sont mises en évidence afin de rendre le cours plus pertinent pour les étudiants.

L'équipement offre des possibilités considérables de recherche supplémentaire sur le sujet et les instructeurs peuvent souhaiter encourager et soutenir cette recherche.

### Objectif

Ce cours présente aux étudiants les concepts et les dispositifs utilisés dans une gamme de systèmes de contrôle des processus. Il est idéal pour l'enseignement de l'unité 45 du BTEC Higher National : Industrial systems et peut être utilisé dans n'importe quel cours portant sur le contrôle industriel des processus et des systèmes.

### Connaissances préalables

Les étudiants ne doivent avoir que des connaissances générales en ingénierie.

#### À propos de ces fiches de travail

Ces feuilles de travail fournissent un environnement pratique pour l'étude du contrôle des processus. Ce n'est pas la seule ressource dont l'étudiant aura besoin. Les étudiants bénéficieront également de cours magistraux, de travaux dirigés, de manuels et d'autres ressources.

fournis par l'instructeur. Les expériences réalisées dans le cadre de ce cours doivent être intégrées à l'enseignement afin de présenter la théorie qui les sous-tend, et renforcées par des exemples écrits, des devoirs et des calculs. Internet est une riche source d'informations sur ce sujet et l'enseignant doit donner aux étudiants des devoirs de recherche en conséquence.

La ressource d'apprentissage se présente sous la forme d'une série de feuilles de travail. Un document de référence est disponible séparément et les étudiants devront s'y référer pour obtenir des instructions sur la manière d'utiliser le matériel et les logiciels fournis.

Il est prévu que les étudiants reçoivent leur propre copie des fiches de travail, soit une par une, soit en paquet, mais qu'ils prennent des notes sur des feuilles de papier séparées. L'instructeur doit s'assurer que la compréhension des étudiants suit le rythme de leur progression dans les fiches de travail. Une façon de le faire est de "signer" chaque fiche de travail.

Les "réponses" ne sont pas incluses. Ils sont faciles à calculer et sont souvent subjectifs.

### Horaires

Les notes de l'instructeur indiquent l'heure du premier passage avec le premier équipement utilisé par les élèves.  
Vers 8 heures

- 10 heures au total. Bien sûr, cela dépend de la capacité des étudiants et du nombre d'équipements de contrôle de processus que vous utilisez. Pour le deuxième équipement, les étudiants peuvent prendre la moitié du temps et pour le troisième équipement, cela peut prendre un tiers du temps. Il faut absolument donner aux étudiants la possibilité de travailler avec plus d'un équipement, car les problèmes et les caractéristiques sont très différents.

## Objectifs d'apprentissage

Lorsqu'il est utilisé avec le logiciel fourni :

- Systèmes à commande électronique
- Transducteurs et contrôleurs, dispositifs d'entrée et de sortie
- Contrôle par ordinateur
- Point de consigne, valeur du processus
- Schémas de principe des systèmes de contrôle
- Systèmes de contrôle ON/Off
- Systèmes de contrôle en boucle ouverte
- Systèmes de contrôle en boucle fermée
- Constantes de temps dans les systèmes de contrôle
- Erreurs et hystérésis
- Étalonnage des capteurs et des actionneurs et facteurs d'échelle
- Équation de contrôle et termes  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$
- Contrôleurs P uniquement
- Contrôleurs PI
- Contrôleurs PID
- Systèmes de contrôle numérique
- Effets de la fréquence d'échantillonnage dans les systèmes numériques
- Approximations de Ziegler Nichols pour les systèmes de contrôle
- Codage informatique des systèmes de contrôle
- Enroulement et serrage intégrés
- Filtrage dérivé
- Réglage manuel des systèmes de contrôle
- Fonctions de transfert et plan  $s$
- Systèmes numériques échantillonnés et termes Z

L'utilisation de Matlab permet d'atteindre de nombreux autres objectifs d'apprentissage, notamment

- Fonctions de transfert
  - L'utilisation des pôles et des zéros dans un diagramme de Smith pour la stabilité et la performance
- Notez que ces feuilles de travail ne couvrent pas ce travail mais que l'équipement est doté d'une API permettant d'écrire des programmes en Matlab pour faciliter cette étude.

Travailler..	Notes pour l'instructeur	L'heure
Général	<p>Au moment de la rédaction du présent document, il existe 5 systèmes de contrôle des processus : Pression, température, débit, niveau et pendule/servo. La raison pour laquelle il existe 5 systèmes différents est que les processus ne sont pas identiques. Les constantes de temps sont différents et différents types de contrôle fonctionnent avec différents types de processus. Les étudiants ont besoin d'une expérience pratique de plus d'un processus.</p> <p>Je vous recommande personnellement de commencer par la pression : elle se comporte relativement bien et réagit rapidement. L'utilisation de la température seule frustrera les étudiants car les constantes de temps sont longues et chaque changement effectué par les étudiants prendra 5 minutes pour voir les effets. La température devrait être le dernier dispositif utilisé par les étudiants - et ils doivent en faire l'expérience car il s'agit probablement du processus le plus important dans l'industrie.</p> <p>Une seule série de fiches de travail permet de travailler avec les 5 systèmes. Notre objectif est que les élèves complètent les feuilles de travail pour un système et passent ensuite à l'étape suivante.</p> <p>suivant. Il va de soi que le deuxième passage sera beaucoup plus rapide que le premier, car les termes, les procédures et les logiciels seront familiers. En règle générale, on peut supposer que le deuxième passage sera deux fois moins long que le premier.</p> <p>Les étudiants doivent recevoir une copie numérique du document de référence qui détaille le fonctionnement du matériel et du logiciel. Ils devront s'y référer au fur et à mesure qu'ils travailleront sur les feuilles de travail. Les étudiants ou un technicien devront installer les logiciels des ordinateurs qui seront utilisés - y compris les pilotes USB.</p> <p><b>Réponses</b></p> <p>Nous ne mettons généralement pas les réponses dans la feuille de travail - dans le contrôle des processus, les mesures sont souvent subjectives et il n'y a donc pas de réponse unique. Nous disposons d'un document qui montre des résultats qui aboutissent à peu près à la même chose. Le document sur les résultats porte le code de produit CT9228 et est disponible auprès de Matrix ou de ses revendeurs. Il montre de nombreux réglages de Process Control, des graphiques et des calculs de Zeigler Nichols et vous permettra de gagner du temps lors des démonstrations à votre classe.</p>	

Fiche de travail	Notes pour l'instructeur	L'heure
Général	<p>Utilisation de l'équipement via l'internet</p> <p>L'équipement est équipé de connexions Wi-fi et LAN afin de pouvoir être utilisé sur Internet. Nous avons réussi à le faire ici au Royaume-Uni et la largeur de bande de la connexion est un facteur important dans l'expérience des étudiants. Il existe un paramètre de diviseur de débit de données dans la section des propriétés du logiciel PID qui limite le débit de données utilisé pour les graphiques et vous devez peut-être expérimenter avec ce paramètre pour obtenir de bons résultats. L'expérience des étudiants lors de l'utilisation de cet équipement sur Internet n'est pas aussi bonne que lorsqu'ils sont à côté de l'équipement et elle peut être améliorée par l'utilisation de caméras. L'appareil Level fonctionne particulièrement bien ici en tant que</p> <p>La caméra donne une bonne idée de ce qui se passe.</p>	

Travailler..	Notes pour l'instructeur	L'heure
1 Compréhension de l'entraînement	Dans la première feuille de travail, nous présentons aux élèves l'équipement et certains termes relatifs au contrôle du processus : Entraînement, charge, etc. L'application logicielle utilisée ici est "Open ManualControl.bat" qui donne aux élèves l'accès au contrôleur électronique sans tenir compte des facteurs d'échelle - afin qu'ils puissent comprendre comment les systèmes numériques utilisent la modulation de largeur d'impulsion pour les processus de pilotage. L'entraînement PWM varie toujours entre 0 et 100 %. L'entraînement affecte les différents processus de différentes manières. Les élèves déduisent un facteur d'échelle de leur travail. Pour le PID, il s'agit d'une valeur de départ - l'équation du PID compense toutes les erreurs.	40 minutes
2 Compréhension des senseurs	Dans les systèmes de contrôle, les capteurs ont souvent besoin d'être mis à zéro, étalonnés et mis à l'échelle. Les élèves utilisent "Open ManualControl.bat" qui leur permet de trouver un facteur d'échelle pour le capteur et, dans certains systèmes, de vérifier la valeur du capteur numérique par rapport à un équivalent analogique connu. Il s'agit d'une compétence qu'il est bon de comprendre, même si de plus en plus de capteurs sont numériques et n'ont pas d'équivalent analogique.	40 minutes
3 Systèmes de commande marche/arrêt	Les élèves peuvent explorer les systèmes de commande marche/arrêt à l'aide du programme "Open". OnOffControl.bat'. Ils doivent entrer les facteurs d'échelle déduits dans la feuille de travail précédente dans les propriétés du logiciel. Si vous avez plus d'un type d'appareil de contrôle de processus, vous pouvez obtenir Les étudiants doivent comparer leurs notes à ce stade : La commande marche/arrêt peut être acceptable pour de nombreux systèmes de commande, mais c'est un désastre pour d'autres. Il serait utile de comparer la commande marche/arrêt de différents systèmes en même temps. Les étudiants peuvent comprendre les effets de l'hystérésis et définir les valeurs d'activation et de désactivation dans le logiciel Propriétés afin de mieux comprendre ce phénomène.	40 minutes
4 Constante de temps du système	On demande aux étudiants de mesurer les constantes de temps de l'équipement, qui sont très différentes. Les constantes de temps diffèrent en fonction des charges et des paramètres du système, comme les poids sur le pendule asservi. Les principaux effets des constantes de temps concernent le réglage de la fréquence de contrôle et le calcul de Ziegler-Nichols.	40 minutes

Fiche de travail	Notes pour l'instructeur	L'heure
5 Contrôleur P	<p>Open PIDControl.bat" est le logiciel que les étudiants utiliseront pour la majeure partie de leur travail avec l'équipement et c'est le logiciel pour le reste de l'étude.</p> <p>feuilles de travail. C'est ici que commence le véritable apprentissage des systèmes PID. Les élèves apprennent qu'il y a toujours un décalage dans les régulateurs P uniquement et que ce décalage est proportionnel au gain <math>K_p</math>. Les élèves sont exposés à la fonction de contrôle et à sa représentation sous forme de schéma fonctionnel. Ils doivent également commencer à comprendre comment caractériser les performances d'un système à l'aide d'une variation par paliers de la valeur du point de consigne.</p>	60 minutes
6 Contrôleur PI	<p>Les élèves peuvent développer le contrôleur P uniquement avec une fonction intégrale. Ils apprennent que le décalage disparaît et ils verront également certains systèmes devenir instables avec les valeurs de <math>K_p</math> et <math>K_i</math>. L'acquisition d'une sensation qualitative des effets des différentes valeurs de <math>K_p</math> et <math>K_i</math> dans différents systèmes est essentielle. Les graphiques des différentes valeurs sont très utiles pour le réglage manuel ultérieur.</p>	60 minutes
7 Régulateur PID	<p>Les étudiants peuvent développer le contrôleur PI seul avec une fonction différentielle. La valeur du terme <math>d</math> varie selon l'équipement et lorsque le temps de réponse est court, les termes <math>d</math> peuvent souvent ajouter du bruit et l'utilisation du terme <math>d</math> sans filtrage de la dérivée peut s'avérer inefficace dans certains systèmes. Les étudiants peuvent trouver cela frustrant car il n'y a souvent pas de "réponse" au problème. Le système de pression fonctionne bien sans filtre dérivé. Le pendule asservi est très difficile à faire fonctionner sans filtre dérivé car le moteur à courant continu est puissant et le disque est directement couplé - il s'agit d'une constante de temps très courte.</p> <p>Dans cette feuille de travail, nous présentons à l'élève les termes <math>s</math>, les termes <math>Z</math> et la manière dont l'équation de contrôle peut être reliée à la fonction de transfert. Les fonctions de transfert sont bien expliquées ailleurs - le plus souvent pour des systèmes analogiques. Trouver sur internet de bonnes explications sur les fonctions de transfert en numérique</p> <p>Les systèmes d'information sont difficiles (laissez-nous le savoir). Bien sûr, nous n'allons pas faire tout cela en une demi-page de texte, mais nous en avons souligné quelques éléments pour que vous puissiez vous en inspirer. Ce qui est frustrant ici, c'est que le code pour le contrôle numérique des processus</p> <p>Le codage des systèmes PID est si facile : étant donné que le codage est si omniprésent, nous avons jugé nécessaire de montrer aux étudiants comment coder les systèmes PID à chaque étape. La compréhension de l'enroulement et du filtrage dérivé est facilitée par l'examen du codage.</p>	40 minutes

Fiche de travail	Notes pour l'instructeur	L'heure
8 Algorithme de Zeigler Nichols	<p>Zeigler Nichols est un joli raccourci pour les systèmes de contrôle qui - pour les systèmes qui se comportent bien - signifie que l'analyse du système dans le plan <math>s</math> avec des pôles et des zéros n'est pas nécessaire. Zeigler Nichols est bien documenté pour les systèmes analogiques mais les systèmes numériques doivent être traités légèrement différemment - la fréquence de contrôle fait partie du calcul - vous devrez diviser la valeur de <math>K_i</math> par la fréquence d'échantillonnage et vous devrez multiplier la valeur de <math>K_d</math> par la fréquence d'échantillonnage pour obtenir les valeurs dont vous avez besoin. Les étudiants devraient créer une feuille de calcul simple contenant ces calculs, car ils l'utiliseront souvent. Définir le point de "stabilité neutre" est difficile dans certains systèmes :</p> <p>Certains se comportent magnifiquement (Pression) et dans d'autres cas (pendule servo), il est difficile de voir où commence le point de "stabilité neutre".</p>	40 minutes
9 Enroulement intégral	<p>Le graphique du logiciel illustre parfaitement le problème de l'enroulement intégral et la solution apportée par le serrage intégral. Les étudiants peuvent également tester le système avec un "défaut" tel qu'un tube obstrué ou un roulement bloqué et voir comment le glissement se produit.</p>	40 minutes
10 Filtre dérivatif	<p>Comme pour l'enroulement intégral, le graphique du logiciel est superbe pour montrer la différence que le filtrage dérivé peut faire. Certains systèmes ne fonctionnent pas bien lorsque le filtrage dérivé est désactivé.</p>	40 minutes
11 Accord manuel	<p>Les élèves ont besoin de temps pour jouer avec les systèmes afin de comprendre comment les termes <math>K_p</math>, <math>K_i</math>, <math>K_d</math> affectent chaque système et de savoir comment modifier les valeurs manuellement. Il s'agit d'un peu d'art noir et les élèves auront besoin de soutien et d'explications.</p>	60 minutes
MATLAB / Labview	<p>Toutes sortes de choses sont possibles avec des logiciels avancés comme MATLAB et Labview. Nous n'avons pas tenu compte de ces utilisateurs dans les feuilles de travail, mais l'équipement dispose d'une API complète que ces utilisateurs peuvent exploiter et utiliser pour des opérations plus mathématiques. L'API est détaillée dans le document de référence CP5956.</p>	

# Contrôle des versions



19 11 20 première libération

27 07 21 Matériel supplémentaire ajouté pour l'appareil à pendule asservi.

23 08 21 Notes du tuteur ajoutées

28 07 23 Reformaté au nouveau style