

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**  
**Département Génie Electrique**  
**Spécialité Automatique**



**Mémoire de master**  
**en automatique**  
**THÈME**

Etude et mise au point d'une boucle de régulation  
de niveau en cascade avec le débit dans la station  
didactique FESTO

**Réalisé par :**  
**CHAIB Ibtissam**

**Proposé et dirigé par :**  
**Mr. R. ILLOUL**  
**Mr.M.BOUKHTALA**

**Juin 2015**  
*Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie*

---

# Remerciements

---

*Je tien tout d'abord à exprimer mes profondes gratitudes au Dieu le Tout Puissant qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie vivement ma mère, mon père qui a contribué à la finalisation de ce travail, ainsi que tous les membres de ma famille pour leur soutien financier et moral durant tout mon cursus étudiantin.*

*La préparation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le suivi de m promoteur : R.IELLOUL Professeur à l'ENP, et M.BOUKHITALA Professeur à l'ENP à qui je tiens à assurer également ma sincère et totale gratitude et ma profonde reconnaissance pour avoir dirigé et accordé beaucoup d'intérêt à mes travaux, car sans leurs aides précieuses ce travail n'aurait jamais pu voir le jour .Je le remercie pour leurs qualité humaine et surtout de m'avoir toujours soutenu par leurs conseils judicieux.*

*Je remercie aussi les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en évaluant men modeste travail.*

*Je tiens à remercier les enseignants de notre Ecole Nationale Supérieure Polytechnique pour tout ce qui nous ont transmis, leurs efforts et leur disponibilité.*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de mon sincère gratitude.*

*Je voudrais également passer mes très vifs remerciements à mes camarades de promotion 2015.*

---

# Dédicaces

---

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents que j'aime par-dessus tout, qui par leur sacrifices, leur amour, leur patience, leur soutien et leurs encouragements m'ont permis de toujours persévérer, de viser haut et surtout de toujours donner le meilleurs de moi-même, afin de réussir .*

*Je dédie ce travail également,*

*A mes frères.*

*A mes sœurs.*

*A mes Nièces et mes neveux.*

*A Tous mes enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique*

*A mes amis.*

*A toute personne me portant de l'estime et à toute personne pour qui je porte de l'estime.*

## ملخص

العمل المنجز في المذكرة يتمحور على ضبط عوامل المتحكم في دوائر التحكم في الماء على التوالي مع التدفق, و ذلك في المحطة التعليمية التجريبية المتواجدة في دائرة الهندسة الآلية في المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
الكلمات المفتاحية  
التحكم بالتوالي, تحكم متقدم, ضبط متحكم الدوائر, فاسطو.

## RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire est basé essentiellement sur l'étude et la mise au point d'une boucle de régulation de niveau en cascade avec le débit dans la station didactique FESTO qui se trouve dans le département automatique de l'Ecole Nationale Polytechnique

Mots clés :

Régulation en cascade, commande avancé, synthèse de régulateur PID, FESTO.

## ABSTRACT

The work presented in this paper is based on the synthesis the level cascade regulation with the flow, of the didactics station FESTO, in the Department of Automation of the national polytechnic school.

Key words:

Cascade regulation, advanced regulation, the synthesis of PID control, FESTO.

## **Introduction**

Dans un procédé industriel, chaque boucle de régulation a pour objectif de maintenir une grandeur physique (dite « grandeur réglée ») égale à une valeur souhaitée (Consigne), quelles que soient les variations des grandeurs perturbatrices, à l'aide d'un actionneur agissant sur une grandeur réglante. Et à l'aide d'un dispositif (matériel ou logiciel) nommé « régulateur » qui détermine le signal de commande de l'actionneur en recherchant à annuler l'écart entre la grandeur réglée et la consigne. En fonction des performances souhaitées

Notre travail de master a pour objectif de réguler une boucle de niveau en cascade avec le débit dans la maquette didactique FESTO. Ce type de contrôle s'impose généralement pour les procédés à dynamique très inerte où la boucle simple ou le PID classique a atteint sa limite. Ce contrôle utilise deux régulateurs : régulateur maître et régulateur esclave. On distingue deux types de contrôle en cascade : cascade sur grandeur intermédiaire et cascade sur grandeur réglante.

La mise au point de la commande en cascade de niveau a été effectuée en commençant d'abord par la mise au point de la boucle esclave : identification réglage et passage en automatique du point de fonctionnement choisi. Ensuite, c'est la boucle maîtresse qui a été mise au point : identification de la fonction de transfert réglante de niveau avec asservissement en boucle fermée de la grandeur réglante.

## 1. La régulation

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon les critères prédéfinis par un cahier de charges. Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement. Le cahier des charges définit des critères qualitatifs à imposer, comme par exemple, de stabilité, de précision, de rapidité ou de lois d'évolution. [1]

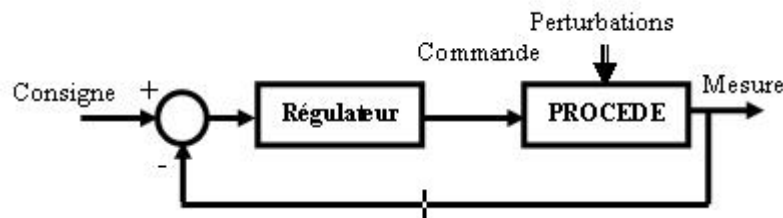
## 2. Régulateur PID

Les systèmes asservis pouvaient présenter quelques contre-performances : une précision permanente insuffisante, une marge de stabilité trop faible, un temps de réponse trop élevé, un dépassement trop important, au regard des spécifications d'un cahier des charges. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans la boucle un organe appelé correcteur (Régulateur) dont l'objectif est d'améliorer les performances de la boucle fermée.

Le régulateur le plus répandu est le régulateur 'Proportionnel, Intégral, Dérivateur' ou PID. Compte tenu de sa simplicité et de sa performance, Il est de ce fait utilisé sur la grande majorité des installations industrielles.

Dans ce qui va suivre on va comprendre le fonctionnement d'un PID, et de déterminer la structure de réglage la mieux adaptée à un processus, et de déterminer les paramètres les mieux adaptés

L'emplacement usuel du régulateur dans une boucle est situé dans la chaîne d'action, juste après le comparateur comme le montre la figure suivante :



*Figure 1: L'emplacement usuel du régulateur*

Son principal rôle est de satisfaire les spécifications contenues dans un cahier des charges. Celles-ci peuvent être formulées de différentes manières, mais dans tous les cas, elles traduisent les performances relatives à la stabilité, à la précision et à la rapidité : Temps de réponse, dépassement, marges de stabilité (marge de gain ou marge de phase), précision permanente, bande passante en boucle ouverte ou en boucle fermée, coefficient de qualité, etc.

Le correcteur doit permettre de répondre au cahier des charges et de réaliser le meilleur compromis entre les spécifications lorsque celles-ci ne peuvent pas être satisfaites simultanément.

Outre ces spécifications de performance, on trouve également des spécifications relatives aux contraintes matérielles : éviter la saturation, respecter la puissance admissible par l'actionneur, respecter les seuils...etc. Un meilleur cahier des charges, c'est celui qui tient compte de ces spécifications et une meilleure réalisation d'une boucle de régulation est celle qui respecte ces spécifications matérielles.[1]

## 2.1. Etude des actions PID [2]

On s'intéresse dans ce paragraphe à l'étude des actions du module PID composé par les trois actions de base. On mettra en évidence l'effet produit par chaque action dans une boucle de régulation, ses avantages ainsi que ses limitations.

### 2.1.1. Régulateur proportionnel (P)

- **Présentation** Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi et permet donc d'améliorer notablement la rapidité, la précision et la stabilité. La loi de commande  $s(t)$  est proportionnelle à l'écart  $e(t)$  entre la consigne  $C(t)$  et la mesure  $M(t)$ :

$$s(t) = K_p e(t) = K_p (C(t) - M(t)) \quad R(p) = \frac{S(p)}{\varepsilon(p)} = K_p$$

- **Caractéristique fréquentielle**

L'action proportionnelle intervient sur toute la bande de fréquences. Dans le plan de Bode, le diagramme de gain est une droite horizontale située à  $20\log(K_p)$ . Quant à la phase, elle est nulle quelle que soit la valeur de  $K_p$  positive.

Associée à la fonction de transfert globale du système (actionneur + Procédé + transmetteur), l'action P a tendance de déplacer le lieu de transfert en boucle ouverte vers le haut si  $20\log(K_p)$  est positif ( $K_p > 1$  : élargissement de la bande passante) ou vers le bas si  $20\log(K_p)$  est négatif ( $K_p < 1$  : rétrécissement de la bande passante).

### 2.1.2. Régulateur intégrateur pur (I)

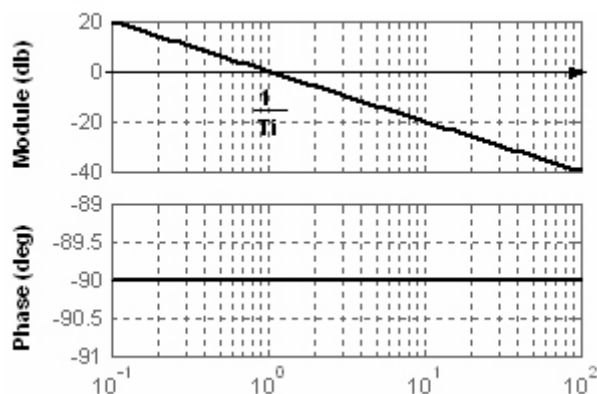
- **Présentation** Pour un intégrateur pur, la loi de commande  $s(t)$  est de la forme:  $s(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$  d'après la transformée de Laplace d'une fonction intégrale, on a :  $s(p) = \frac{1}{p.T_i} \varepsilon(p)$  La fonction de transfert d'un correcteur intégrateur pur est par conséquent:  $R(p) = \frac{S(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{p.T_i}$  La constante de temps  $T_i$  exprimée souvent en unité de temps est appelée la constante de temps d'intégration.

- **Caractéristique fréquentielle**

En posant  $p = j\omega$ , on a :  $R(j\omega) = \frac{1}{T_i \cdot \omega} e^{-90^\circ}$  Le module en db est  $-20 \log(T_i \cdot \omega)$ . La courbe de gain varie de  $+\infty$  à  $-\infty$  lorsque  $\omega$  varie de 0 à l'infini et coupe l'axe 0db à la pulsation  $\omega = 1/T_i$ . La phase est

constante et égale à  $-90^\circ$  quelle que soit  $\omega$ .

La figure suivante représente le lieu de transfert  $R(j\omega)$  dans le plan de Bode avec  $T_i = 1$



*Figure2: Caractéristique fréquentielle de l'action I*

Compte tenu de la correspondance entre la basse fréquence et le régime permanent, l'action intégrale permet d'apporter un gain infini en basses fréquences, ce qui est bénéfique à la précision permanente. En revanche, elle apporte un déphasage de  $-90^\circ$ , ce qui nuit à la stabilité. On retrouve par conséquent le dilemme stabilité-précision

### 2.1.3. Régulateur dérivateur pur (D) et régulateur dérivateur filtré

- **Présentation**

La loi de commande est de la forme  $s(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ , soit d'après la transformée de

Laplace :  $S(p) = T_d \cdot p \cdot \varepsilon(p)$

La fonction de transfert du correcteur dérivé est donc :  $R(p) = \frac{S(p)}{\varepsilon(p)} = T_d \cdot p$

La constante de temps  $T_d$  de dimension l'unité de temps est appelée la constante de temps de dérivation. Elle intervient également comme un gain.

La fonction de transfert de ce type de correcteur est purement théorique : un système physique ne peut pas avoir un numérateur de degré supérieur à celui du dénominateur.

Le correcteur approchant le mieux l'effet dérivé tout en étant réalisable est un correcteur dérivateur filtré de la forme :

$$R(p) = \frac{T_d \cdot p}{1 + \tau \cdot p}$$

Avec  $\tau = \frac{T_d}{N}$  et N entier  $> 1$

- **Caractéristique fréquentielle**

L'analyse fréquentielle de cette action s'obtient en posant  $p = j\omega$  :

$$R(j\omega) = \begin{cases} T_d \cdot \omega \cdot e^{-90^\circ} & \text{sans filtrage} \\ \frac{T_d \cdot \omega}{\sqrt{1 + (\tau \cdot \omega)^2}} e^{(90^\circ - \arctg(\tau\omega))} & \text{avec filtrage} \end{cases}$$

- En basses fréquences :  $\omega \rightarrow 0$

$$\text{module} \begin{cases} 0 \Rightarrow 20 \cdot \log|R(j\omega)| = -\infty & \text{sans filtrage} \\ 0 \Rightarrow 20 \cdot \log|R(j\omega)| = -\infty & \text{avec filtrage} \end{cases}$$

$$\text{phase} \begin{cases} 90^\circ & \text{sans filtrage} \\ 90^\circ & \text{avec filtrage} \end{cases}$$

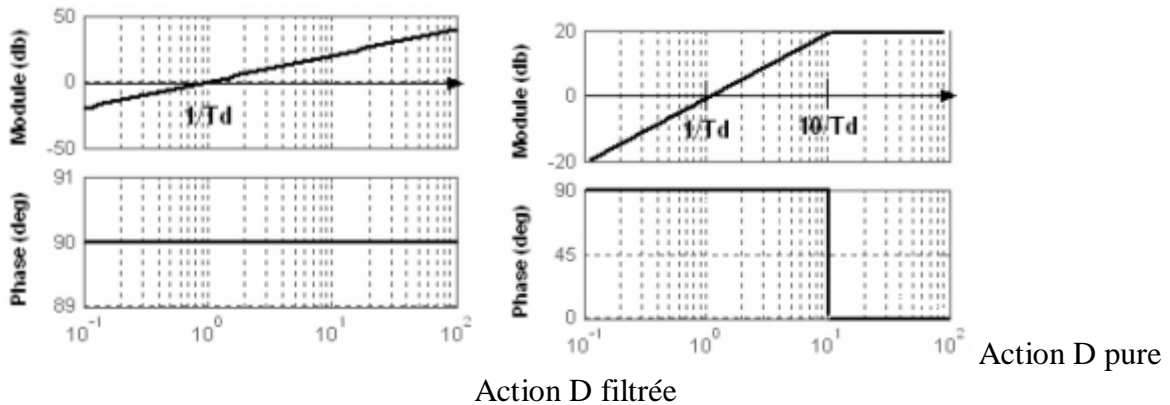
- En hautes fréquences :  $\omega \rightarrow \infty$

$$\text{module} \begin{cases} \infty \Rightarrow 20 \cdot \log|R(j\omega)| = \infty & \text{sans filtrage} \\ \frac{T_d}{\tau} \Rightarrow 20 \cdot \log|R(j\omega)| = 20 \cdot \log\left(\frac{T_d}{\tau}\right) & \text{avec filtrage} \end{cases}$$



$$phase \begin{cases} 90^\circ & \text{sans filtrage} \\ 0^\circ & \text{avec filtrage} \end{cases}$$

La figure suivante représente le diagramme asymptotique dans le plan de Bode d'un régulateur dérivé pur et filtré avec  $T_d=1$  et  $N=10$  :



*Figure 3 : Caractéristique fréquentielle de l'action D*

La caractéristique fréquentielle de l'action D sans filtrage montre qu'il y'a amplification des signaux de hautes fréquences, notamment les bruits de mesure qui s'ajoutent au signal utile. Ces bruits se retrouvent aussi ajoutés au signal d'erreur. Le régulateur D dérive non seulement le signal d'erreur utile mais aussi le signal bruit. Celui-ci se trouve alors amplifié.

Le fait d'ajouter un passe-bas de pulsation de cassure  $1/t = N/T_d$  permet de limiter l'amplification des hautes fréquences et par conséquent de filtrer le signal à traiter par le régulateur. Sans cette précaution, la boucle risque d'être en perpétuelle agitation.

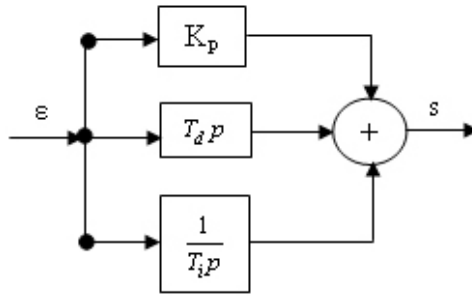
Cependant l'ajout d'un passe-bas dans la boucle, augmente l'ordre du dénominateur de la fonction de transfert en boucle ouverte, ce qui risque de pénaliser la dynamique du système si la constante de temps du filtre est choisie de même ordre de grandeur que celles du système ( $N$  faible), mais par contre le filtrage sera efficace dans ce cas. En revanche si la constante de temps du filtre est choisie suffisamment grande par rapport à  $1/T_d$  ( $N$  grand), alors son influence sera négligeable sur la dynamique du système, mais le filtrage risque d'être médiocre. Un compromis s'impose sur le choix de  $N$  et en pratique un rapport  $N = 5$  à  $10$  est recommandé.

## 2.2. Structure des régulateurs électroniques [2]

Les différentes structures suivantes sont apparues grâce à l'emploi des amplificateurs opérationnels. On distingue trois structures pour les régulateurs PID:

### 2.2.1. La structure parallèle :

$$R(p) = K_p + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i \cdot p}$$



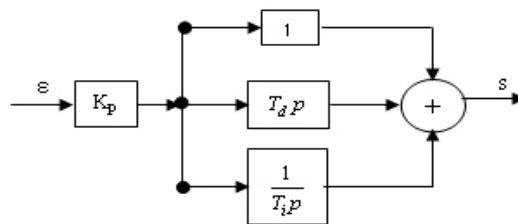
*Figure 4 : La structure parallèle.*

L'expression temporelle de la commande est donnée par :

$$s(t) = K_p \varepsilon(t) + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

### 2.2.2. La structure mixte

$$R(p) = K_p \left( 1 + T_d \cdot p + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$



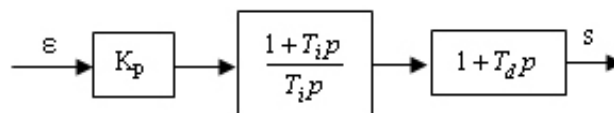
*Figure.5 : la structure mixte*

L'expression temporelle de la commande est donnée par :

$$s(t) = K_p (\varepsilon(t) + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau)$$

### 2.2.3. La structure série

$$R(p) = K_p (1 + T_d \cdot p) \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$



*Figure 6 : La structure série.*

L'expression temporelle de la commande est donnée par :

$$s(t) = K_p \frac{T_i + T_d}{T_i} \varepsilon(t) + K_p T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

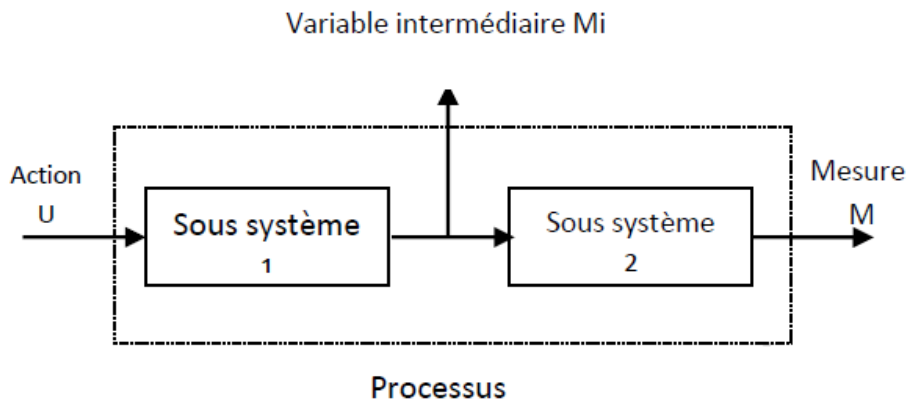
Il existe un lien fort entre les paramètres puisque le réglage de l'action Proportionnelle  $K_p$  influe par exemple sur l'action Intégrale et que  $T_i$  influe sur l'action Proportionnelle.

### 3. Généralité sur la régulation en cascade[3]

#### 3.1. Définition de la régulation cascade

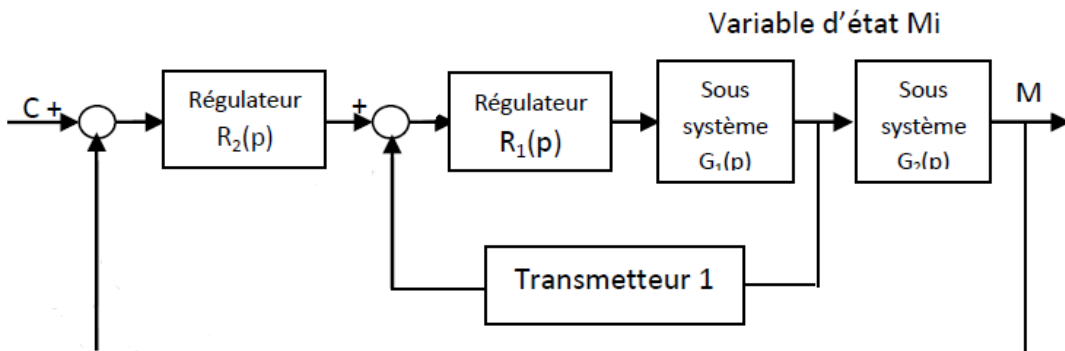
La régulation cascade est une technique utilisée pour permettre aux procédés qui ont une dynamique lente d'avoir une réponse rapide face aux perturbations extérieures ainsi qu'aux changements de consigne.

L'idée repose sur la décomposition d'un processus complexe en plusieurs sous-systèmes. On suppose pour fixer les idées une décomposition en deux sous-systèmes comme le montre la figure suivante :



*Figure 7: décomposition en deux sous-systèmes*

La variable intermédiaire  $M_i$  généralement appelée variable d'état, possède la propriété d'être en avance temporelle par rapport à la grandeur de mesure  $M$ . Si par exemple une modification sur l'action  $U$  ou une perturbation affectant le sous-système 1, la variable d'état  $M_i$  sera la première à être affectée avant la variable de mesure  $M$ . En d'autres termes, la grandeur d'état  $M_i$  permet de renseigner sur l'état futur de  $M$ . Cette forme de prédiction peut être exploitée judicieusement pour réaliser une régulation cascade.



*Figure 8: boucle de régulation en cascade*

La grandeur principale est contrôlée par une boucle 'maître' avec un régulateur  $R_2(p)$ , dont la sortie sert de consigne à la boucle secondaire, régulé par le régulateur  $R_1(p)$ .

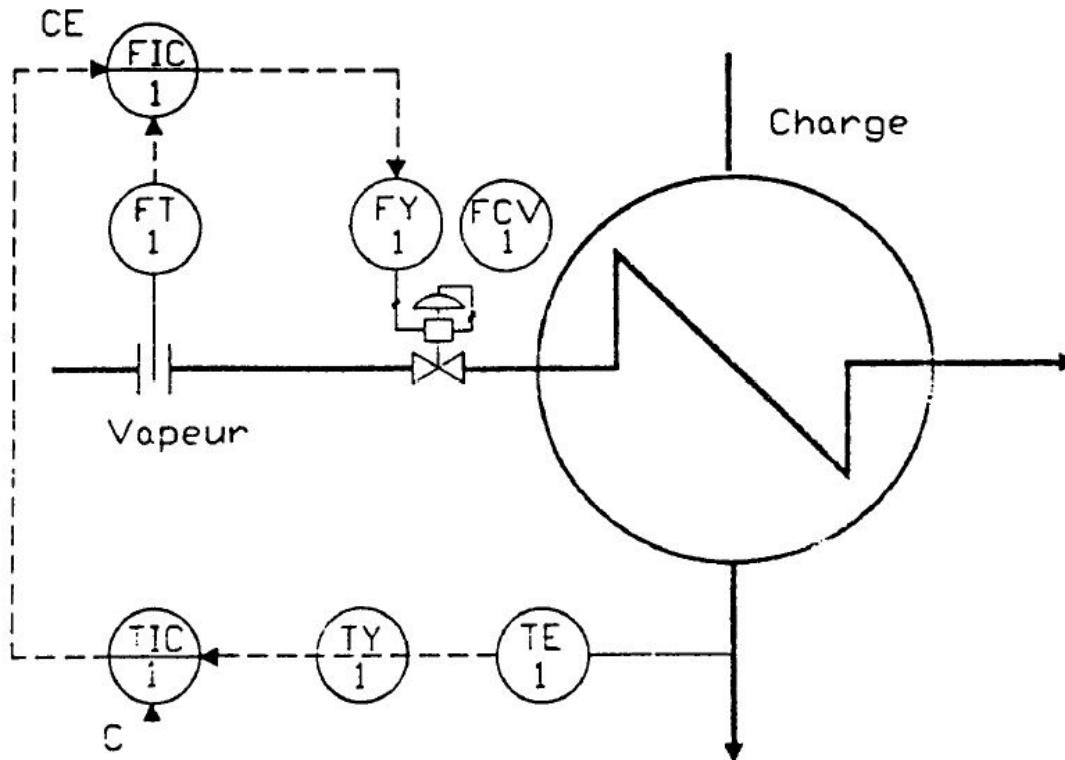
Le reproche qu'on fait habituellement à une boucle de régulation classique est que le régulateur ne commence à réagir pour effectuer une correction suite à l'effet d'une perturbation qu'une fois qu'il en est informé, c'est-à-dire qu'une fois que la mesure s'en trouve modifiée.

Avec la structure cascade, si une perturbation affecte le sous-système 1, celle-ci sera prise en charge par la boucle interne. Cette boucle doit être bien dimensionnée de manière à ce qu'elle soit rapide, et ainsi l'effet de la perturbation peut être neutralisée sans qu'il y'a une répercussion significative sur la grandeur principale.

### 3.2. Les types de la régulation en cascade

On distingue deux types de la régulation en cascade : cascade sur grandeur réglante et cascade sur grandeur intermédiaire

#### 3.2.1. Cascade sur grandeur réglante :



*Figure 9 : cascade sur grandeur réglante.*

Le régulateur pilote TIC1 reçoit la mesure de la grandeur réglée  $T_s$  et sa sortie commande la consigne externe CE du régulateur asservi FIC1. Le régulateur pilote à deux modes de fonctionnement :

- Manuel.
- Automatique avec consigne interne.

Le régulateur asservi FIC1 reçoit la mesure de la grandeur réglante  $Q_c$ , sa sortie commande la vanne FCV1. Il a trois modes de fonctionnement :

- Manuel.
- Automatique avec consigne interne.
- Automatique avec consigne externe.

Il faut noter que ce type de régulation cascade est efficace uniquement sur les perturbations affectant la grandeur réglante.

#### 3.2.2. Cascade sur la grandeur intermédiaire

Dans ce type de cascade, la boucle interne régule une grandeur intermédiaire de même nature que la grandeur réglée et en partie soumise aux mêmes perturbations.

La position de la grandeur intermédiaire est telle qu'elle subit les perturbations avant la grandeur réglée.

L'intérêt de la cascade sur la grandeur intermédiaire, par rapport à celle sur la grandeur réglante, est le fait qu'elle corrige un plus grand nombre de perturbations.



## Etude et mise au point d'une boucle de régulation de niveau en cascade avec le débit dans la station didactique FESTO

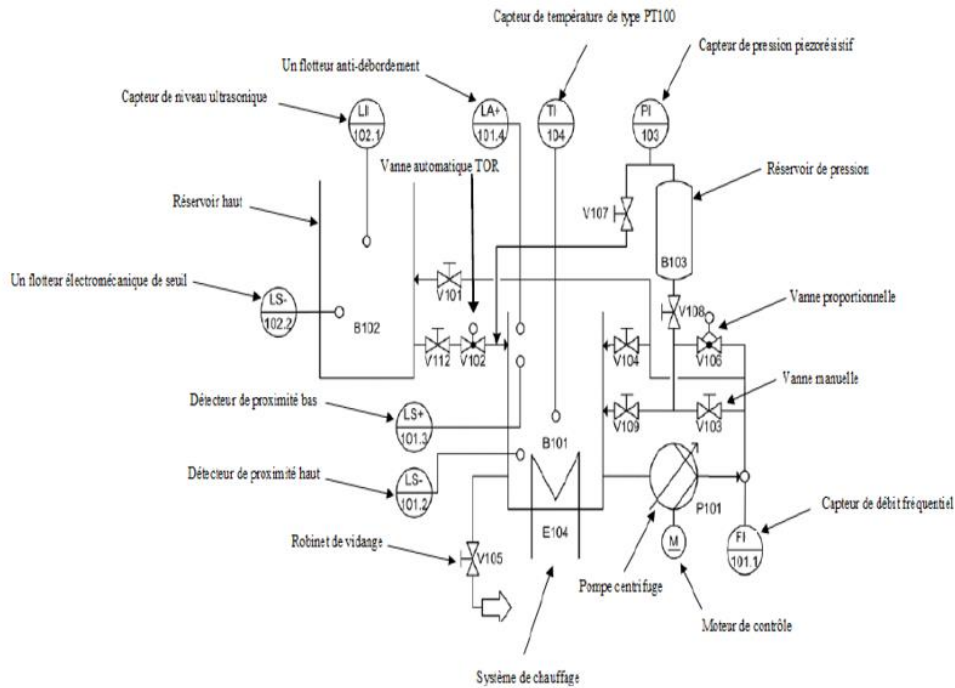


Figure 12: schéma synoptique de la station FESTO [5]

Notre but dans cette étude c'est de calculer les bons paramètres afin de contrôler le niveau de remplissage du réservoir B102 par la régulation de débit analogique avec la pompe comme élément de contrôle.

- La vanne TOR permet de recycler une partie du fluide au réservoir et constitue donc un moyen de créer une perturbation sur cette grandeur.
- Dans ce circuit, un capteur de débit « FIC101 » et un capteur de niveau « LIC102 » sont installés pour mesurer les variables régularisées.
- Ce procédé est contrôlé par un automate programmable s7-300 lié avec un superviseur « Wincc RT » à travers une interface HMI

Après avoir effectué les configurations nécessaires, le diagramme synoptique de l'installation devient :

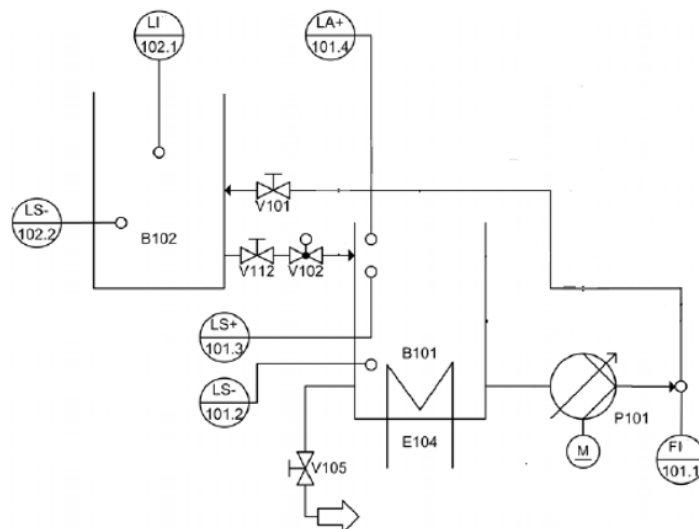


Figure 13 : la synoptique de la régulation en cascade.[4]

Les figures 14, 15 montrent le schéma bloc et le schéma fonctionnel de la régulation en cascade de niveau d'eau dans le réservoir b102. C'est une régulation en cascade sur grandeur réglante (le débit du fluide procédé) car celle-ci subit des fluctuations. La boucle esclave mesure le débit fluide procédé, le régule par action sur la vitesse de la pompe. La boucle maîtresse mesure le niveau d'eau dans le réservoir et détermine la consigne du régulateur esclave. Ainsi toute perturbation sur le débit du fluide procédé sera détectée et atténuée en boucle fermée avant qu'elle agisse sur le niveau.

• **Schéma bloc**

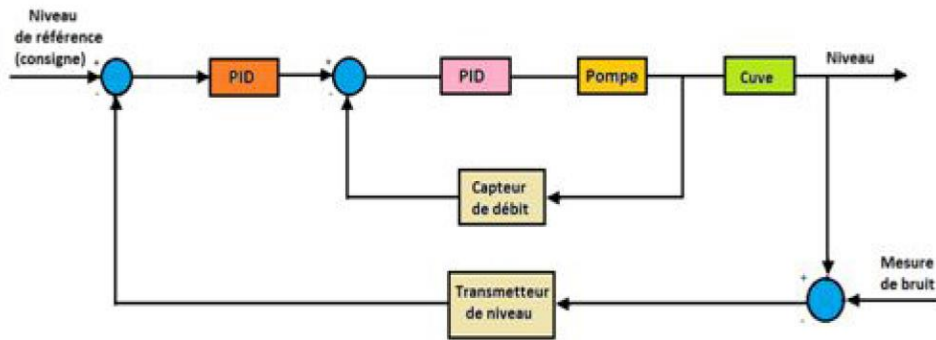


Figure 14 : Schéma bloc de la régulation en cascade de niveau

▪ **Schéma fonctionnel de la boucle en cascade**

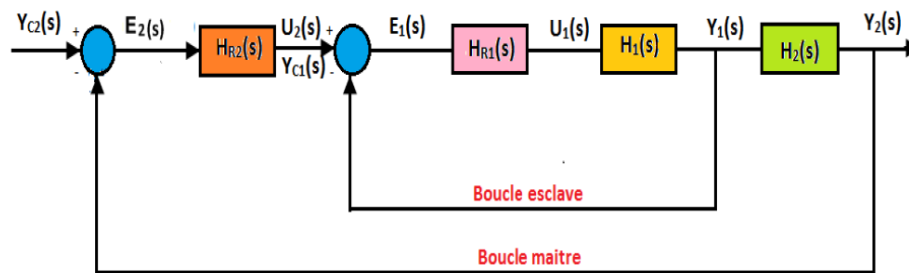


Figure 15 : Schéma fonctionnel de la boucle en cascade

Avec

$H_{R1}(s)$  : Fonction de Transfert du régulateur esclave.

$H_{R2}(s)$  : Fonction de Transfert du régulateur maître.

$H_1(s)$  : Fonction de Transfert de débit du fluide procédé.

$H_2(s)$  : Fonction de Transfert liant le débit du fluide procédé et le niveau dans la cuve.

$U_1(s)$  : commande de régulateur esclave.

$U_2(s)$  : commande de régulateur maître.

$Y_1(s)$  : grandeur réglée de la boucle esclave : le débit.

$Y_2(s)$  : grandeur réglée de la boucle maîtresse : le niveau.

$Y_{C1}(s)$  : consigne débit.

$Y_{C2}(s)$  : consigne niveau.

$E_1(s)$  :  $Y_{C1}(s) - Y_1(s)$

$E_2(s)$  :  $Y_{C2}(s) - Y_2(s)$

▪ **Schéma fonctionnel équivalent**

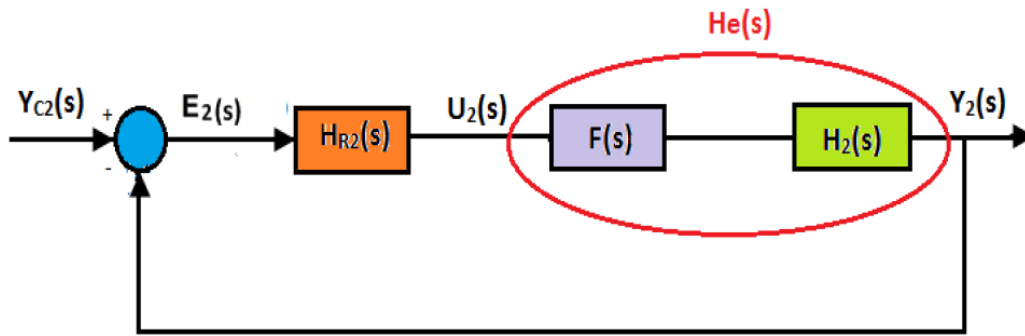


Figure 16 : Schéma fonctionnel équivalent

**4.1.Fonction de transfert réglante de la boucle esclave (régulation de débit)-réglage**

Pour l'identification de ce système, nous nous sommes basés sur l'étude de la réponse indicielle en boucle ouverte. On envoie un échelon à la pompe d'amplitude 100% et on relève la réponse qui est représentée dans la figure ci-dessous à l'aide de l'interface d'identification :

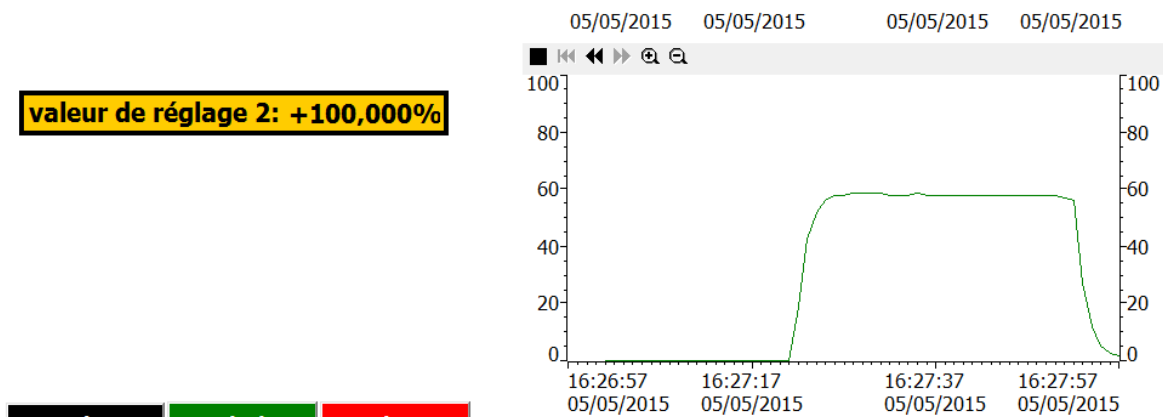


Figure 17 : Réponse indicielle du débit (pompe) en boucle ouverte.

- Afin d'identifier le système de réglage de débit (la boucle interne) nous avons utilisé une interface d'identification par la méthode de strejc, et nous avons trouvé la fonction de transfère suivante

$$H_1(s) = \frac{3}{16s^2 + 8s + 1}$$

- Et pour la synthèse nous avons utilisé la méthode de NASLIN, qui nous a permet de trouver les paramètres suivants :

$$\begin{cases} K_p = 0.333 \\ T_i = 4s \end{cases}$$



#### 4.2. Fonction de transfert réglante de la boucle maitresse (régulation en BF du débit) :

- Après avoir calculé les paramètres de la boucle interne, nous les avons introduit dans l'interface d'identification de la boucle extérieure afin de l'identifier

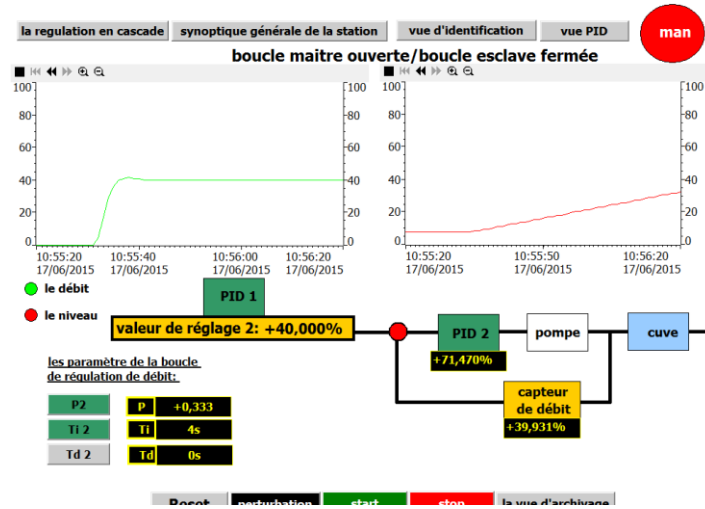


Figure 18 : l'interface d'identification de la boucle extérieure

- Nous avons activé l'archivage des données de niveau, puis nous avons introduit le fichier d'archivage dans une interface d'identification par la méthode de strejck et nous avons trouvé la fonction de transfère suivante :

$$H_2(s) = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{s(1 + 1.5s)}$$

Le système contenant déjà une intégration, on utilise un régulateur P. Pour le calcul du gain, on calcul la fonction de transfert en boucle fermée et on la met sous la forme :

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2}$$

Avec  $\begin{cases} \omega_n^2 = K_p \cdot 5,33 \cdot 10^{-3} \\ 2 \cdot \varepsilon \omega_n = 0.66 \end{cases}$

Si on impose  $\varepsilon=0.7$  on trouve  $K_p = 41.6$

#### Les résultats :

Après avoir introduire les paramètres de la boucle interne et la boucle externe nous avons trouvé les résultats suivants :

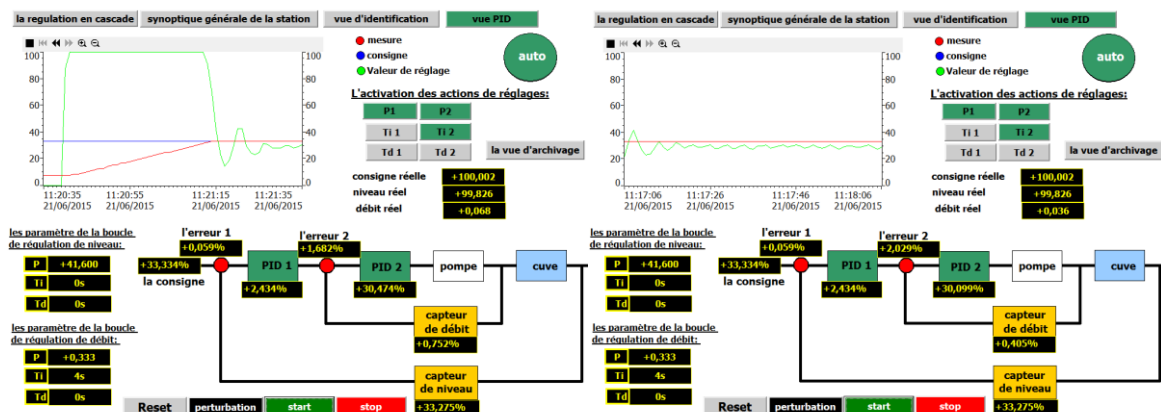


Figure 19 : les résultats de synthèse

### **Conclusion**

L'étude d'une régulation en cascade du niveau d'eau dans une cuve agitée nous a permis de retenir que l'on obtient une boucle de régulation plus performante que la boucle simple . En effet, elle augmente la rapidité du procédé en réduisant son retard ou inertie ainsi que sa constante de temps et elle augmente sa précision en augmentant le gain de la boucle fermée. Ces résultats ont été prouvés théoriquement et expérimentalement.

Pour atteindre ces performances, la boucle esclave doit être stable et la plus rapide possible. Dans ce cas et comme la cascade est sur la grandeur réglante, nous avons constaté que toute perturbation agissant directement sur la grandeur réglante est fortement atténuée avant qu'elle agisse sur la grandeur réglée.

### **Conclusion générale**

Le travail de master qui nous a été proposé est la mise au point d'une boucle de régulation-asservissement en cascade de niveau d'eau dans le réservoir B102 de la station FESTO. Ce type de contrôle s'impose généralement pour les procédés à dynamique très inerte où la boucle simple ou le PID classique a atteint sa limite. Ce contrôle utilise deux régulateurs : régulateur maître et régulateur esclave et on distingue deux types de contrôle en cascade : cascade sur grandeur intermédiaire et cascade sur grandeur réglante objet du présent travail. Dans cette régulation, la grandeur réglée est le niveau et la grandeur réglante est le débit du fluide procédé sur lequel on agit moyennant la vitesse d'une pompe hydraulique.

Au début nous avons déterminé expérimentalement la fonction de transfert réglante de la boucle esclave : boucle de régulation du débit du fluide procédé dont la consigne est la grandeur réglante de la boucle esclave. Ensuite nous avons procédé à un réglage idéal de cette boucle. C'est-à-dire, le régulateur PID a été déterminé de manière à obtenir une réponse en boucle fermée ordre le plus rapidement possible,

Après, nous avons procédé à l'identification expérimentale de la fonction de transfert réglante de la boucle maitresse

L'étude expérimentale de la régulation en cascade ,sur grandeur réglante, du niveau nous a permis aussi de retenir que toute perturbation agissant directement sur la grandeur réglante est fortement atténuée avant qu'elle agisse sur la grandeur réglée.

• **Bibliographie :**

[1] Commande des procédé, jean-pierre CORRIOU, génie des procédés de l'école de Nancy lavoisier, TEC&DOC 1996 ,574p

[2] AUTOMATIQUE (Systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état Cours et exercices corrigés), *Yves Granjon*, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) et directeur de l'ENSEM à Nancy 2e édition DUNOD

[3] Etude et mise au point d'une boucle de régulation en cascade 'Cascade control'  
Application à la régulation en cascade de niveau d'eau dans une cuve parfaitement agitée  
(*AMINE DAKOUNE, OUSSAMA CHOUKAI*) PFE, 2011-2012, *Filière génie des procédés*

[4] Programmation et supervision d'une commandes avancées et identification en ligne avec acquisition de données pour la station de travail FESTO, CHAIB Ibtissam, *Projet de fin d'études, Juin 2015*

[5] J.HELMICH, «Compact workstation manual », FESTO, 2004

---

# TABLES DES MATIERES

Introduction.....	1
1. Généralité sur la régulation.....	2
2. Régulateur PID.....	2
2.1. Etude des actions PID [2] .....	3
2.1.1. Régulateur proportionnel (P).....	3
2.1.2. Régulateur intégrateur pur ( I ).....	3
2.2. Structure des régulateurs électroniques [2] .....	6
2.2.1. La structure parallèle : .....	6
2.2.2. La structure mixte .....	6
2.2.3. La structure série .....	6
3. Généralité sur la régulation en cascade[3] .....	7
3.1. Définition de la régulation cascade .....	7
3.2. Les types de la régulation en cascade .....	8
3.2.1. Cascade sur grandeur réglante :.....	8
3.2.2. Cascade sur la grandeur intermédiaire .....	9
4.1. Fonction de transfert réglante de la boucle esclave (régulation de débit)-réglage .....	12
4.2. Fonction de transfert réglante de la boucle maitresse (régulation en BF du débit) : .....	13
Conclusion générale.....	15
Bibliographie.....	16

---

# Liste des figures

Figure 1: L'emplacement usuel du régulateur .....	2
Figure2: Caractéristique fréquentielle de l'action I .....	4
Figure 3 : Caractéristique fréquentielle de l'action D .....	5
Figure 4 : La structure parallèle.....	6
Figure.5 : la structure mixte .....	6
Figure 6 : La structure série.....	6
Figure 7:décomposition en deux sous-systèmes .....	7
Figure 8: boucle de régulation en cascade.....	7
Figure 9 : cascade sur grandeur réglante.....	8
Figure 10 : cascade sur grandeur intermédiaire.....	9
Figure 11 : la station de travail FESTO .....	9
Figure 12:schéma synoptique de la station FESTO [4].....	10
Figure 13 : la synoptique de la régulation en cascade.[4] .....	10
Figure 14 : Schéma bloc de la régulation en cascade de niveau .....	11
Figure 15 : Schéma fonctionnel de la boucle en cascade .....	11
Figure 16 : Schéma fonctionnel équivalent .....	12
Figure 17 : Réponse indicielle du débit (pompe) en boucle ouverte.....	12
Figure 18 : l'interface d'identification de la boucle extérieure .....	13
Figure 19 : les résultats de synthèse.....	13